



**PENGARUH DAUR ULANG
BAHAN BONGKARAN ASPAL
TERHADAP SIFAT – SIFAT FISIK BETON ASPAL
(STUDI KASUS DI JALAN GAJAHMADA TEGAL)**

TESIS

Diajukan dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan
Program Magister Teknik Sipil

Oleh :

**HERMAN SUROYO
NIM. L4A.001.008**

**PROGRAM PASCA SARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2004**

HALAMAN PENGESAHAN

PENGARUH DAUR ULANG BAHAN BONGKARAN ASPAL TERHADAP SIFAT – SIFAT FISIK BETON ASPAL (STUDI KASUS DI JALAN GAJAHMADA TEGAL)

Disusun Oleh

HERMAN SUROYO
NIM. L4A.001.008

Dipertahankan di depan Tim Penguji pada Tanggal:
29 April 2004

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk
memperoleh gelar Magister Teknik Sipil

Tim Penguji

1. Ketua : Ir. Muhrozi, MS
2. Sekretaris : Drs. Bagus Priyatno, ST, MT
3. Anggota 1 : Dr. Ir. Sri Prabandiyani RW, M.Sc
4. Anggota 2 : Bagus Hario Setiadji, ST, MT
5. Anggota 3 : Ir. Roeswan Soediro, MS

1.....
2.....
3.....
4.....
5.....

Semarang, 29 April 2004
Universitas Diponegoro
Program Pasca Sarjana
Magister Teknik Sipil,
Ketua



ABSTRAK

Pada masa layanan, kinerja perkerasan jalan akan mengalami penurunan. Pemeliharaan dan rehabilitasi diperlukan untuk memelihara tingkat layanan. Sepanjang periode pemeliharaan jalan *overlay* menyebabkan elevasi muka jalan terus bertambah. Cara lain untuk menghemat bahan dan tetap mempertahankan elevasi muka jalan adalah dengan metoda daur ulang. Metode Daur ulang sangat potensial untuk diterapkan pada kegiatan perbaikan dan pemeliharaan jalan khususnya jalan Nasional. Teknik daur ulang dilakukan dengan cara menggunakan mesin penggaruk/pengupas lapis permukaan jalan aspal (*cold milling*) dengan ketebalan tertentu, menggemburkan dan mencampurnya dalam keadaan panas dengan menambah aspal dan agregat kemudian menghamparkannya di atas jalan lama tanpa menambah tebal lapis permukaannya dan dapat meningkatkan nilai struktural Jalan.

Studi ini dilakukan dengan penelitian laboratorium untuk mengamati perubahan sifat-sifat fisik bahan utama pembentuk perkerasan beton aspal yaitu aspal dan agregat akibat pengaruh daur ulang. Untuk bahan benda uji digunakan bahan bongkaran dari ruas jalan Gajahmada Tegal, yang mempergunakan lapisan beton aspal sebagai pelapisan ulang tahun 2003. Dari hasil penelitian laboratorium dan data sekunder berupa *job mix formula* beton aspal jalan Gajahmada tahun 1999/2000, riset ini menjelaskan efek dari daur ulang pada aspal beton.

Hasil uji pemisahan material yang dilakukan terhadap bahan bongkaran 2003 didapat nominal size terbesar $\frac{1}{2}$ " lebih kecil dari spec. *job mix AC* $\frac{3}{4}$ ", terjadi penurunan (mengecilnya butiran agregat). Hasil uji kualitas Abrasi menunjukkan agregat pada *job mix* 24,16 % > abrasi agregat hasil bongkaran didapat 35,80, terjadi kenaikan tetapi masih memenuhi spesifikasi max. 40%, Hasil uji *Sand equivalent* agregat pada *job mix* 64,80% < *Sand equivalent* agregat hasil bongkaran didapat 86,67%, terjadi kenaikan tetapi masih memenuhi spesifikasi min. 50%. Sedangkan aspal mengalami perubahan, seperti Penetrasi aspal pada *job mix* 73,5 mm > penetrasi aspal hasil bongkaran didapat 57,20 mm, mengalami penurunan, hasil uji tes Daktilitas menunjukkan aspal pada *job mix* diatas 150 cm > Daktilitas aspal hasil bongkaran didapat 87.5 cm, mengalami penurunan. Perubahan sifat-sifat fisik dari bahan utama pembentuk perkerasan beton aspal tersebut masih berada dalam batas standar spesifikasi, dengan cara memodifikasi kadar aspal, agregat bongkaran tetap sebagai pembanding digunakan agregat baru dan standar digunakan spec. *job mix AC* tahun 1999/2000, hasil yang diperoleh seperti halnya : Untuk analisa ketiga rongga (*VMA*, *VFA*, dan *VIM*) menunjukkan ketiga campuran baik, dengan nilai *Job Mix AC* (15,62%;76,76%;4,10%), campuran *recycling* agregat bongkaran (14,94%;79,22%;3,11%), dan campuran *recycling* agregat baru (15,30%;75,23%;3,79%), Hasil pengujian benda uji (Stabilitas, *Flow*, *MQ* dan *ISS*) menunjukkan ketiga campuran baik, dengan nilai *Job Mix AC* (1102 kg; 3,1mm; 348,5 kg/mm; 79%), campuran *recycling* agregat bongkaran (1265 kg; 3,09 mm; 411,8 kg/mm; 91%), dan campuran *recycling* agregat baru (1274 kg; 3,04 mm; 425,3kg/mm; 92%). Dengan pemanfaatan material jalan secara optimal maka teknik daur ulang merupakan salah satu alternatif untuk pemeliharaan dan rehabilitasi lapis keras lentur.

Kata Kunci :Daur ulang, bahan bongkaran

ABSTRACT

During the service period, the performance of road pavement would be degraded. Maintenance and rehabilitation are needed to maintain the service level. So far the maintenance is carried out by *overlay* that used a lot of asphalt and aggregate and caused the road surface elevation increased. The efficient road maintenance that be able to keep the road surface elevation is *recycle method*. Recycle method is potential to be applied in road maintenance, specially the National Road. Recycle technique can be conducted by using activator machine/peeler to grap surface of asphalt pavement (*cold milling*) for certain thickness, by scarifying and mingling it in a state of heat by adding aggregate and asphalt and then overlay on road without increasing the thickness of the surface layer and it can improve structural value of the road.

This study is conducted at laboratory to observe the physical changes of the main materials using asfalt concrete i.e : asphalt and aggregate due to recycling. The materials samples used are those taken from broken down material of Gajahmada road Tegal at 2003. Based on the Laboratory analysis and supported by secundaury data formed Job Mix Formula Aspalth Concrete at Gajahmada Street in 1999/2000, this research describe the effects of recylcling on Aspalth Concrete (AC)

The result of separation test conducted to the broken down material 2003 found the largest nominal size $\frac{1}{2}$ " smaller than AC spec Job Mix $\frac{3}{4}$ ", decreasing aggregate size. The result of abration quality showed that aggregate at Job Mix is 24,16 , greater than the broken down of aggregate abration 35,80 , increase but still fulfill the maximum specification of 40%.Result of sand aggregate equivalent test at job mix 64,80 less than Sand Equivalent aggregate of the broken down material of 86,67%, increase but still fulfill the minimum specification 50%. While natural asphalt change as the asphalt penetration at job mix 73,5 mm greater than the asphalt penetration of broken down ones got 57,20 mm, decreased, the test result of ductility of unloaded asphalt got 87,5 cm, decrease. The physical change of the main material of concrete asphalt hardness is still in the standard boundary of the specification by modifying asphalt rate, broken down aggregate and standard used spec Job Mix AC 1999/2000 the result obtained are: The three cavities (VMA,VFA and VIM) showing the values of three mixtures of Job Mix AC (15.62%, 76.76%, 4.10%), the mixtures of broken down aggregate recycling (14.94%, 79.22%,3.11%) and the new aggregate recycling (15.30%,75.23%,3.79%)

Result the material/object test (Stability, Flow, MQ and ISS) showed that the rates/value of three mixture Job mix AC (1102 kg, 3.1 mm, 348.5 kg/mm,79%), the broken down recycling aggregate (1274 kg, 3.04 mm, 411.8 kg/mm, 91%) and new recycling aggregate (1274 kg, 3.04 mm, 425.3 kg/mm,92%). By optimizing the road material the recycling technique, It may be used as an alternatif of flexible pavement layer maintenance and rehabilitation .

Key Word: Recycle, Unloaded materials

PRAKATA

Puji syukur penyusun panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan petunjuk-Nya sehingga tesis dengan judul Pengaruh Daur Ulang Terhadap Sifat – Sifat Fisik Beton Aspal Pada Bahan Bongkaran Aspal (Studi Kasus di Jalan Gajah Mada Tegal).

Tesis ini disusun sebagai syarat menyelesaikan studi pada Program Magister Teknik Sipil Konsentrasi Transportasi Program Pasca Sarjana Universitas Diponegoro. Selama menyelesaikan tesis ini, penulis banyak menerima petunjuk, saran, bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak. Sehubungan dengan hal tersebut penulis mengucapkan rasa terima kasih yang tulus kepada :

- 1) Dr. Ir. Suripin, M. Eng., selaku Ketua Program Pasca Sarjana Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro,
- 2) Dr. Ir. Bambang Riyanto, DEA., selaku Sekretaris Program Pasca Sarjana Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro,
- 3) Ir. Muhrozi, MS., selaku Dosen Pembimbing I,
- 4) Drs. Bagus Priyatno, ST., MT., selaku Dosen Pembimbing II,
- 5) Dr. Ir. Sri Prabandiyani, M Sc., dan Bagus Hario Setiadji, ST., MT., selaku Tim Pembahas.
- 6) Ir. Roeswan Soediro, MS selaku Dosen Penguji
- 7) Para dosen dan staf Administrasi Program Pasca Sarjana Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro.
- 8) Pimpinan dan staf Laboratorium Teknik Sipil Akademi Teknologi Semarang,
- 9) Semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tesis ini.

Mudah-mudahan tesis ini berguna untuk pengembangan lebih lanjut bagi kemajuan bidang KeBinamargaan pada umumnya dan pengembangan teknologi konstruksi Jalan pada khususnya.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRAC	iv
PRAKATA	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Maksud dan Tujuan Penelitian	2
1.3. Manfaat Penelitian	2
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Umum	5
2.2. Lapis Keras Jalan	5
2.2.1. Faktor-Faktor Penyebab Kerusakan Lapis Keras	6
2.2.2. Jenis Kerusakan Lapis Keras dan Penyebabnya	9
2.3. Rehabilitasi dan Pemeliharaan Lapis Keras	11
2.3.1. Pemeliharaan	11
2.3.2. Rehabilitasi	13
2.4. Metode Daur Ulang	14
2.5. Agregat dan Gradasi	15
2.5.1. Agregat	15
2.5.2. Gradasi	16
2.5.3. Aspal	17
2.6. Persyaratan Perencanaan Campuran Beraspal Panas	19
2.7. Metoda Pengujian <i>Marshall Test</i>	21
2.7. Hipotesis	22
2.8. Hasil Penelitian yang Relevan	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	26
3.1. Umum	26
3.2. Bagan Alir Penelitian	27
3.3. Metode Analisis Hasil penelitian	28
3.4. Sumber Data	29

3.4.1. Data Laboratorium	29
3.4.2. Data Sekunder	31
3.5. Bahan - Alat	31
3.5.1. Bahan – Bahan	31
3.5.2. Alat – Alat	31
3.6. Rencana Penelitian	33
3.6.1. Peengambilan Sampel Uji	33
3.6.2. Perencanaan Campuran Aspal Panas Laston AC	34
3.6.3. Uji Laboratorium	38
3.7. Analisa Hitungan	41
3.7.1. Berat Jenis <i>Bulk</i> dan <i>Apparent</i> dai Total Agregat	41
3.7.2. Berat Jenis <i>Effektif</i> dari Total Agregat	41
3.7.3. Volume Campuran dan Berat Jenis Campuran setelah Pemadatan	42
3.7.4. Penyerapan Aspal	42
3.7.5. Kadar Aspal <i>Effektif</i>	42
3.7.6. Rongga Udara (<i>Air Void</i>)	43
3.7.7. Stabilitas dan <i>Flow</i>	43
3.7.8. <i>Marshall Quotient</i> dan Indeks Kekuatan Sisa	44
3.7.9. Pemeriksaan Aspal Ekstraksi (<i>Asphalt Extraction Test</i>)	44
3.8. Komparasi data Sekunder	45
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	46
4.1. Umum	46
4.1.1. Kondisi Perkerasan yang di Daur Ulang	46
4.1.2. Spesifikasi Perkerasan Lama (tahun 1999/2000)	46
4.1.3. Data Hasil Penelitian Laboratorium dari bahan Bongkaran	49
4.1.4. Perencanaan Campuran (<i>Mix Design</i>) dari Bahan Bongkaran	50
4.2. Hasil Pengujian Material di Laboratorium	52
4.2.1. Hasil pemeriksaan Sifat Fisik Agregat	52
4.2.2. Hasil Pemeriksaan Sifat Fisik Aspal	55
4.2.3. Hasil Pengujian <i>Marshall</i> dan Indek Stabilitas Sisa Tahap I pada kadar Aspal Optimum	58
4.2.4. Hasil Pengujian <i>Marshall</i> dan Indek Stabilitas Sisa Tahap II pada kondisi Standar	59
4.3. Pembahasan	60

4.3.1. Pengaruh Kadar Aspal pada Laston tipe X dari Pengujian <i>Marshall</i> dan ISS Tahap I	60
4.3.2. Pengaruh Pengujian <i>Marshall</i> dan ISS Tahap II pada agregat baru dan Agregat lama / Hasil bongkaran Campuran Laston tipe X dengan penetapan kadar aspal hasil <i>Reclaimed</i> dan variasi Kadar aspal baru	69
4.4. Evaluasi Hasil Laboratorium uji <i>Marshall</i> dan ISS dengan <i>Job Mix AC</i> 1999/2000 dan Campuran <i>Recycling</i> menggunakan Agregat Lama dan Agregat Baru terhadap Spesifikasi Campuran Laston tipe X	80
4.5. Evaluasi hasil uji Aspal Hasil Bongkaran Aspal dengan <i>Cold Milling</i>	81
4.6. Evaluasi hasil uji Agregat Hasil Bongkaran Aspal Dengan <i>Cold Milling</i>	83
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	86
5.1. Kesimpulan	86
5.1.1. Hasil Uji Fisik Aspal	86
5.1.2. Hasil Uji Fisik Agregat	87
5.1.3. Hasil Uji <i>Marshall</i> dan ISS terhadap Campuran Laston	88
5.2. Saran	89
DAFTAR PUSTAKA	90

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
2.1.	Persyaratan Agregat	16
2.2.	Persyaratan Aspal Keras Penetrasi 60/70	19
3.1.	Spesifikasi pengujian bahan agregat	29
3.2.	Persyaratan untuk aspal	30
3.3.	Gradasi Campuran Lapis Aspal Beton Tipe X	30
3.4.	Target Gradasi Campuran Lapis Aspal Beton Tipe X	35
3.5.	Jumlah Sampel benda Uji yang direncanakan untuk <i>Marshall</i> Standar	36
3.6.	Variasi Kadar Aspal Benda Uji Agregat Lama (bangkaran Aspal) untuk Pengujian <i>Marsahall</i> dan ISS	37
3.7.	Variasi Kadar Aspal Benda Uji Agregat Baru untuk Pengujian <i>Marsahall</i> dan ISS	37
4.1.	Karakteristik AC 60/70 Bahan Beton Aspal 1999/2000	47
4.2.	Karakteristik Agregat Spesifikasi <i>Job Mix</i> 1999/2000	47
4.3.	Gradasi Campuran Agregat Spesifikasi <i>Job Mix</i> 1999/2000	48
4.4.	Komposisi Campuran Aspal Spesifikasi <i>Job Mix</i> 1999/2000	48
4.5.	Karakteristik Aspal 60/70 Hasil Bongkaran Beton Aspal 1999/2000	49
4.6.	Karakteristik Agregat Hasil Bongkaran Beton Aspal 1999/2000	49
4.7.	Gradasi Campuran Agregat Hasil Bongkaran Beton Aspal 1999/2000	50
4.8.	Hasil Pengujian Ekstraksi Kadar Aspal Bongkaran Spesifikasi 1999/2000	50
4.9.	Analisa Saringan Agregat Kombinasi untuk Perencanaan Campuran	51
4.10.	Hasil pemeriksaan Sifat Fisik Agregat hasil Bongkaran	53
4.11.	Hasil pemeriksaan Sifat Fisik Agregat Baru asal Prupuk Tegal	53
4.12.	Hasil pemeriksaan Sifat Fisik Aspal Pen.60/70 ex. Pertamina	55
4.13.	Hasil <i>Marshall</i> Campuran Laston tipe X	58
4.14.	Hasil Pengujian <i>Marshall</i> Campuran Laston tipe X tahap II pada Kondisi standar	59
4.15.	Kadar aspal terhadap Nilai <i>Density</i> Campuran Laston tipe X	60
4.16.	kadar Aspal terhadap Nilai <i>VMA</i> Campuran Laston tipe X	61

DAFTAR GAMBAR

2.1.	Skema Kerusakan Lapis Keras	10
2.2.	Skema Metoda Daur Ulang	14
3.1.	Bagan Alir tahapan Penelitian	27
3.2.	Skema Analisis Hasil Penelitian	28
3.3.	Spesifikasi Gradasi Campuran Laston tipe X	31
3.4.	Peta Jalan Kota Tegal dan Lokasi Pengambilan Sampel	33
3.5.	Kegiatan Pengupasan Sampel Uji Laboratorium dengan <i>Cold Milling</i>	34
4.1.	Grafik Analisa Saringan Gradasi Kombinasi Spesifikasi 1999/2000	51
4.2.	Penentuan kadar aspal optimum aspal penetrasi 60/70	59
4.3.	Grafik hubungan Kadar Aspal dan <i>Density</i>	60
4.4.	Grafik hubungan Kadar Aspal dan <i>VMA</i>	61
4.5.	Grafik hubungan Kadar Aspal dan <i>VFA</i>	62
4.6.	Grafik hubungan Kadar Aspal dan <i>VIM</i>	63
4.7.	Grafik hubungan Kadar Aspal dan Stabilitas	64
4.8.	Grafik hubungan Kadar Aspal dan <i>Flow</i>	66
4.9.	Grafik hubungan Kadar Aspal dan <i>Marshall Quotient</i>	67
4.10.	Grafik hubungan Kadar Aspal dan ISS	68
4.11.	Grafik hubungan gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai <i>density</i> pada variasi kadar aspal <i>recycling</i>	69
4.12.	Grafik hubungan gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai <i>VMA</i> pada variasi kadar aspal <i>recycling</i>	71
4.13.	Grafik hubungan gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai <i>VFA</i> pada variasi kadar aspal <i>recycling</i>	72
4.14.	Grafik hubungan gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama	

	terhadap nilai <i>VIM</i> pada variasi kadar aspal <i>recycling</i>	73
4.15.	Grafik hubungan gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai Stabilitas pada variasi kadar aspal <i>recycling</i>	75
4.16.	Grafik hubungan gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai <i>Flow</i> pada variasi kadar aspal <i>recycling</i>	76
4.17.	Grafik hubungan gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai <i>MQ</i> pada variasi kadar aspal <i>recycling</i>	78
4.18.	Grafik hubungan gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai ISS pada variasi kadar aspal <i>recycling</i>	79

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A.1	Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar Bongkaran	91
Lampiran A.2.	Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus Bongkaran	92
Lampiran A.3	Pemeriksaan Berat Jenis <i>Filler</i> Debu batu, Pemeriksaan Indek Kepipihan Batu Bongkaran	93
Lampiran A.4	Pemariksaan Keausan agregat dengan Mesin <i>Los Angeles</i> Kelekatan Agregat terhadap Aspal, <i>Sand Equivalent</i>	94
Lampiran A.5	Pemeriksaan <i>Soundness</i> agregat Kasar Bongkaran	95
Lampiran A.6	Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar Baru	96
Lampiran A.7.	Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus Baru	97
Lampiran A.8	Pemeriksaan Berat Jenis <i>Filler</i> Debu batu, Pemeriksaan Indek Kepipihan Batu Baru	98
Lampiran A.9	Pemariksaan Keausan agregat Barudengan Mesin <i>Los Angeles</i> Kelekatan Agregat Baru terhadap Aspal, <i>Sand Equivalent</i>	99
Lampiran A.10	Pemeriksaan <i>Soundness</i> Agregat Kasar Baru	100
Lampiran B.1	Laporan Pengujian Aspal Keras Penetrasi 60/70	101
Lampiran B.2	Pengujian Penetrasi	102
Lampiran B.3	Pemeriksaan Titik Lembek	103
Lampiran B.4	Pengujian Daktilitas	104
Lampiran B.5	Pengujian Kelarutan dalam <i>CCL₄</i>	105
Lampiran B.6	Pengujian Titik Nyala	106
Lampiran B.7	Pengujian Berat Jenis Jenis	107
Lampiran B.8	Pengujian Kehilangan Berat	108
Lampiran B.9	Pengujian Penetrasi setelah Kehilangan Berat	109
Lampiran B.10	Pengujian Daktilitas setelah Kehilangan Berat	110
Lampiran B.11	Laporan Pengujian Aspal Keras Laston	111
Lampiran B.12	Pengujian Penetrasi	112
Lampiran B.13	Pemeriksaan Titik Lembek	113
Lampiran B.14	Pengujian Daktilitas	114
Lampiran B.15	Pengujian Kelarutan dalam <i>CCL₄</i>	115

Lampiran B.16	Pengujian Titik Nyala	116
Lampiran B.17	Pengujian Berat Jenis	117
Lampiran B.18	Laporan Pengujian Aspal Keras Bongkaran	118
Lampiran B.19	Pengujian Penetrasi Aspal Bongkaran	119
Lampiran B.20	Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Bongkaran	120
Lampiran B.21	Pengujian Daktilitas Aspal Bongkaran	121
Lampiran B.22	Pengujian Kelarutan dalam CCL ₄ Aspal Bongkaran	122
Lampiran B.23	Pengujian Titik Nyala Aspal Bongkaran	123
Lampiran B.24	Pengujian Berat Jenis Aspal Bongkaran	124
Lampiran B.25	Laporan Pengujian Ekstraksi Aspal Bongkaran	125
Lampiran C.1	Perhitungan dan Bahan Susun Benda Uji <i>Marshall</i> Campuran AC tipe X Tahap I	126
Lampiran C.2	Sifat Campuran Agregat-Aspal Uji <i>Marshall</i> Tahap I Pada Kadar Aspal Optimum	127
Lampiran D.1	Perhitungan dan Bahan Susun Benda Uji <i>Marshall</i> Campuran AC tipe X Tahap II menggunakan Agregat Baru	128
Lampiran D.2	Sifat Campuran Agregat-Aspal Uji <i>Marshall</i> Tahap II menggunakan Agregat Baru dan Variasi Kadar Aspal <i>recycling</i>	129
Lampiran E.1	Perhitungan dan Bahan Susun Benda Uji <i>Marshall</i> Campuran AC tipe X Tahap II menggunakan Agregat Bongkaran	131
Lampiran E.2	Sifat Campuran Agregat-Aspal Uji <i>Marshall</i> Tahap II menggunakan Agregat Bongkaran dan Variasi Kadar Aspal <i>recycling</i>	132
Lampiran F.1	Sertifikat Kalibrasi	134
Lampiran F.3	Rasio Korelasi Stabilitas	136
Lampiran G	Tipikal Potongan Melintang Jalan Gajahmada Tegal	137
Lampiran H	Gambar L.4.1-L4.33 (Dokumentasi Kegiatan Penelitian)	138

ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

<i>AASHTO</i>	= <i>Assosiation of American Society Highway Transport Organization</i>
<i>AC</i>	= <i>Asphalt Concrete</i>
<i>ASTM</i>	= <i>American Society for Testing and Material</i>
<i>BS</i>	= <i>British Standards Institution</i>
<i>Gsb</i>	= Berat jenis kering/ <i>bulk spesific gravity</i> (gr/cc)
<i>Gsa</i>	= Berat jenis semu/ <i>apparent spesific gravity</i> (gr/cc)
<i>Gse</i>	= Berat jenis efektif/ <i>bulk spesific gravity SSD</i> (gr/cc)
<i>Gsb_{tot} agregat</i>	= Berat jenis kering agregat gabungan (gr/cc)
<i>P₁, P₂, P₃, ...</i>	= Prosentase berat dari masing-masing agregat
<i>Gsb₁, Gsb₂, Gsb₃, ...Gsb_n</i>	= Berat jenis kering dari masing-masing agregat 1,2,3..n
<i>Gsa_{tot} agregat</i>	= Berat jenis semu agregat gabungan
<i>Gsa₁, Gsa₂, Gsa₃, ...Gsa_n</i>	= Berat jenis semu dari masing-masing agregat 1,2,3..n
<i>Gse_{tot} agregat</i>	= berat jenis efektif agregat gabungan
<i>Gse₁, Gse₂, Gse₃, ...Gse_n</i>	= Berat jenis efektif dari masing-masing agregat 1,2,3..n
<i>V_{bulk}</i>	= Volume campuran setelah pemadatan (cc)
<i>W_{SSD}</i>	= Berat dalam kondisi kering permukaan (gr)
<i>W_w</i>	= Berat dalam air (gr)
<i>G_{mb}</i>	= Berat jenis campuran setelah pemadatan (gr/cc)
<i>G_{mm}</i>	= Berat jenis campuran maksimum teoritis setelah pemadatan (gr/cc)
<i>P_b</i>	= Prosentase kadar aspal terhadap total campuran (%)
<i>P_{ba}</i>	= Penyerapan aspal, persen total agregat (%)
<i>P_{be}</i>	= Kadar aspal efektif, persentotal campuran (%)
<i>P_f</i>	= Prosentase kadar <i>Filler</i> terhadap total campuran (%)
<i>P_s</i>	= Kadar agregat, persen total campuran (%)
<i>Puslitbang</i>	= Pusat Penelitian dan Pengembangan
<i>G_b</i>	= Berat jenis aspal (gr/cc)
<i>VIM</i>	= <i>Void In the Mix</i> / Rongga udara pada campuran setelah pemadatan, prosentase dari volume total

<i>VMA</i>	= <i>Void in the Mineral Aggregate</i> Rongga udara pada mineral agregat, prosentase dari volume total
<i>VFA</i>	= <i>Void Filled with Asphalt</i> / Rongga udara yang terisi aspal, prosentase dari VMA
<i>MQ</i>	= <i>Marshall Quotient</i>
<i>MS</i>	= <i>Marshall Stability</i>
<i>MF</i>	= Kelelahan <i>Marshall</i>
ISS	= Indeks Stabilitas Sisa
Msi	= Stabilitas <i>Marshall</i> setelah perendaman 24 jam pada temperatur 60°C
MSs	= Stabilitas <i>Marshall</i> standar pada perendaman selama 30-40 menit pada temperatur 60°C
SNI	= Standar Nasional Indonesia
W_1	= Berat benda uji sebelum di ekstraksi
W_2	= Berat benda uji setelah di ekstraksi
F	= Berat <i>filter</i> sebelum di ekstraksi – berat <i>filter</i> sesudah di ekstraksi
S	= Berat sisa Larutan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan ekonomi dan teknologi, kegiatan masyarakat semakin meningkat. Peningkatan kegiatan masyarakat berdampak juga terhadap peningkatan kegiatan transportasi. Transportasi darat di Indonesia masih berperan besar dalam mobilitas masyarakat. Sebagai negara berkembang, dengan pendapatan perkapita yang relatif kecil menyebabkan masyarakat menengah ke bawah pada umumnya lebih memilih jalur darat.

Sarana dan prasarana transportasi yang aman dan nyaman merupakan kebutuhan bagi kelancaran kegiatan transportasi, disamping faktor ekonomis yang mendasarinya. Jalan beraspal sebagai salah satu prasarana transportasi di Indonesia belum sepenuhnya mencapai kondisi yang aman dan nyaman. Beberapa keadaan yang sering dijumpai adalah semakin rendahnya kualitas aspal sehingga kondisi permukaan jalan menjadi tidak nyaman. Oleh karena itu kegiatan perbaikan dan pemeliharaan jalan menjadi sangat penting untuk kelangsungan kegiatan transportasi.

Adanya kegiatan perbaikan dan pemeliharaan khususnya untuk jalan beraspal, maka pada periode tertentu harus dilakukan pemeliharaan berkala dengan *overlay* atau pelapisan ulang permukaan lapis keras. Overlay yang dilakukan terus-menerus akan membentuk ketebalan jalan yang tinggi, sehingga dapat mengganggu drainase, ketinggian bahu jalan dan kerb jalan serta median. Selain itu pada suatu saat akan timbul kelangkaan material aspal, masalah ini harus diantisipasi sedini mungkin karena aspal sebagai residu minyak bumi merupakan bahan yang tidak terbarukan. Namun dengan inovasi teknologi aspal dapat didaur ulang.

Metode daur ulang sangat potensial untuk diterapkan pada kegiatan perbaikan dan pemeliharaan jalan khususnya jalan perkotaan, jalan kabupaten, jalan provinsi dan jalan Nasional yang perkembangannya sudah tetap. Teknik daur ulang dilakukan dengan cara menggunakan mesin penggaruk/pengupas lapis permukaan jalan aspal (*cold milling*) dengan ketebalan tertentu, menggemburkan dan mencampurnya dalam keadaan panas maupun dingin dengan menambah aspal, agregat dan *modifier* apabila diperlukan, kemudian menghamparkannya di atas jalan lama tanpa menambah tebal lapis

permukaannya. Menurut Soedharmanto & Dardak (1991) proses daur ulang untuk kondisi jalan di Indonesia mempunyai karakteristik sebagai berikut:

1. Ketebalannya lebih dari 10 cm
2. Kadar aspal sekitar 5,5 sampai 6,5 %
3. Nilai struktur sisa dari jalan yang akan ditingkatkan harus dalam kondisi minimal 40% agar bahan yang didaur ulang kualitasnya masih layak dan menguntungkan secara ekonomi.

1.2. Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud penelitian ini adalah sebagai berikut:

Melakukan uji pengaruh daur ulang aspal beton (lapis keras) terhadap sifat-sifat fisiknya pada bahan bongkaran Aspal Jalan Gajahmada, Kota Tegal Jawa Tengah, serta menganalisa kelayakan bahan bongkaran Aspal tersebut terhadap kondisi nyata pelaksanaan pemeliharaan jalan khususnya untuk ruas jalan pada penelitian ini, dengan cara membandingkan sifat-sifat campuran aspal pada hasil *job mix* Formula Beton Aspal Jalan Gajahmada tiga tahun yang lalu dengan bongkaran aspal saat ini, serta membandingkannya dengan kombinasi campuran aspal lama dan baru dengan agregat baru untuk prediksi masa layanan hasil daur ulang.

Tujuan penelitian pada Tesis ini adalah:

1. Memanfaatkan bahan material bongkaran aspal agar bisa digunakan sebagai bahan perbaikan/lapis kembali permukaan jalan
2. Mengetahui sampai sejauh mana penurunan sifat-sifat fisik beton aspal setelah difungsikan sebagai lapis permukaan di Jalan Gajahmada selama tiga tahun (1999 sampai 2002)
3. Mengetahui sampai sejauh mana campuran aspal Bongkaran yang dikombinasi dengan aspal dan agregat baru.

1.3. Manfaat Penelitian

1. Memperluas penggunaan teknik daur ulang terhadap pekerjaan pemeliharaan jalan khususnya di daerah yang jauh dari sumber (*quarry*) dan Aspal Mixing Plant (AMP) agar lebih efektif, efisien dan ekonomis.

2. Menambah referensi perbandingan bagi para pelaksana pemeliharaan jalan mengenai karakteristik fisik bahan daur ulang aspal beton dengan harapan hasilnya dapat dimanfaatkan dan masih memenuhi syarat spesifikasi.
3. Mengetahui perbedaan karakteristik hasil uji material agregat dan aspal dari hasil bongkaran aspal dengan agregat dan aspal baru yang berasal dari lokasi yang sama yaitu Prupuk-Tegal

1.4. Batasan Masalah

Penelitian ini mempunyai batasan pembahasan antara lain:

1. Bahan bongkaran yang didaur ulang dimodifikasi sampai tingkat standar/ memenuhi syarat spesifikasi yang ditentukan, bukan sampai kepada optimasi apalagi efisiensi yang lebih baik dari lapis perkerasan baru.
2. Bahan bongkaran diambil dari kegiatan pemeliharaan di ruas Jalan Gajahmada, Kota Tegal dengan peralatan *Cold Milling* pada lokasi yang mengalami lendutan aspal terutama di pertigaan jalan, dekat *Traffic Light*.
3. Bahan aspal menggunakan aspal Pertamina dengan tingkat konsistensi (penetrasi 60/70).
4. Uji bahan (aspal dan agregat) dilakukan berdasarkan pada Petunjuk Pelaksanaan Lapis Aspal Beton untuk Jalan Raya, SKBI. 2.4.26.1987, Jakarta.
5. Perencanaan gradasi campuran menggunakan campuran lapis aspal beton (LASTON) untuk lapis permukaan dengan gradasi X (rapat) menggunakan metoda tes *Marshall*.
6. Uji Indek Stabilitas Sisa dinyatakan dalam uji perendaman *Marshall* (*Marshall Immersion Test*) selama 24 jam dengan suhu 60⁰ C dan ditunjukkan dalam indeks stabilitas sisa (*Index Retained Strenght*).
7. Penelitian yang dilakukan terbatas pada pengujian laboratorium dan tidak melakukan pengujian lapangan.
8. Penelitian yang dilakukan, tidak membahas masalah faktor kimiawi dan aspek ekonomis.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tesis didasarkan pada buku Pedoman Penyusunan dan Penulisan Tesis Magister Teknik Sipil. Penulisan tesis, dibagi dalam lima bab :

a. Bab I. Pendahuluan

Bab ini merupakan awal dari penyusunan tesis yang berisi latar belakang penulisan tesis, maksud dan tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah , dan sistematika penulisan.

b. Bab II. Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi teori yang digunakan sebagai landasan atau acuan dari penelitian, seperti sifat-sifat agregat dan aspal, sifat *Marshall* dan Indek stabilitas sisa berdasarkan spesifikasi baru, metoda penelitian dan cara pengujian dilaboratorium, hipotesis penelitian dan hasil-hasil penelitian yang relevan.

c. Bab III. Metodologi Penelitian

Bab ini membahas mengenai tahapan dan cara penelitian serta uraian tentang pelaksanaan penelitian, seperti metoda dan disain, bahan penelitian, peralatan penelitian dan dasar-dasar analisis dan perhitungan yang akan digunakan dalam penelitian.

d. Bab IV. Hasil Perhitungan dan Pembahasan

Bab ini membahas tentang hasil-hasil penelitian dan juga menganalisa hasil penelitian serta pembahasannya. Hasil ditampilkan dalam bentuk gambar, grafik dan tabel. Hasil yang akan ditulis dalam kesimpulan harus terlebih dahulu dimunculkan dalam bagian pembahasan ini.

e. Bab V. Kesimpulan dan saran

Bab ini berisi kesimpulan setelah melakukan analisa dalam pembahasan. Kesimpulan merupakan rangkuman hasil pembahasan secara rinci, bab ini juga berisikan saran yang didasarkan hasil penelitian dan diharapkan diadakannya penelitian lanjutan, mengingat batasan-batasan pada penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Umum

Perkerasan jalan dikelompokkan dalam dua kelompok besar yaitu perkerasan lentur dan perkerasan kaku. Perkerasan lentur adalah suatu perkerasan jalan yang terdiri dari beberapa lapisan yaitu lapis permukaan, lapis pondasi atas dan pondasi bawah. Lapisan permukaan dibangun di atas lapisan pondasi atas dan pondasi bawah yang terletak pada tanah dasar yang telah dipadatkan. Perkerasan kaku adalah suatu perkerasan jalan yang terbuat dari semen portland berupa pelat beton dan diantara pelat beton dan tanah dasar boleh dipasang atau tidak dipasang lapis pondasi. (Yoder and Witezak, 1975)

Agregat telah didefinisikan sebagai kumpulan dari pasir, kerikil batu pecah, retak atau bahan lain yang terdiri dari bahan mineral, digunakan bersama-sama dengan bahan pengikat untuk membentuk beton aspal dan beton semen, dan lain sebagainya, atau dipergunakan secara langsung seperti untuk balas rel kereta api, lapisan penyangkutan dan dipakai berbagai proses pembuatan lainnya seperti *fluxing* (Krebs and Walter, 1971).

Aspal adalah suatu cairan *viscous*, atau suatu yang padat, dengan kandungan utama *hydrocarbons* dan turunannya, yang larut dalam *trichloroethylene* dan pada dasarnya tidak mudah menguap dan melunak perlahan-lahan jika dipanaskan. Aspal berwarna hitam atau coklat yang memiliki ketahanan terhadap air dan mempunyai daya lekat Aspal diperoleh dari proses pengilangan minyak dan juga terdapat berupa endapan alam atau sebagai bagian dari aspal alam yang berhubungan dengan bahan mineral.

2.2. Lapis Keras

Lapis keras jalan adalah suatu lapisan yang terletak di atas tanah dasar (*sub grade*) yang telah dipadatkan dan berfungsi untuk memikul beban lalu-lintas. Selanjutnya beban tersebut diteruskan dan disebarkan ke tanah dasar sedemikian sehingga tanah dasar tidak menerima beban melebihi daya dukungnya. Untuk dapat memenuhi fungsi tersebut konstruksi jalan harus direncanakan dan dibangun sedemikian rupa sehingga mampu mengatasi pengaruh beban lalu-lintas maupun kondisi lingkungan.

Konstruksi lapis keras pada umumnya secara sederhana dibagi menjadi dua jenis yaitu:

- a. Lapis keras lentur (*flexible pavement*) yaitu lapis keras yang menggunakan bahan ikat aspal.
- b. Lapis keras kaku / tegar (*rigid pavement*) yaitu lapis keras dengan bahan ikat semen portland.

Pada prinsipnya lapis keras lentur terdiri atas tiga bagian

- a. Lapis fondasi bawah (*subbase course*)
- b. Lapis fondasi atas (*base course*)
- c. Lapis permukaan (*surface course*) yang terdiri atas lapis pengikat (*binder course*) dan *wearing course*.

2.2.1. Faktor-Faktor Penyebab Kerusakan Lapis Keras

Sejak perkerasan jalan dibuka untuk melayani lalu-lintas kendaraan, perkerasan jalan akan mengalami pembebanan akibat lalu-lintas kendaraan, pengaruh kondisi lingkungan serta proses daur ulang lapis keras itu sendiri. Lapis keras akan mengalami penurunan unjuk kerja maupun kualitas, yang berarti lapis keras akan mengalami peningkatan kerusakan. Selain itu kerusakan lapis keras dapat juga diakibatkan oleh adanya kesalahan perencanaan atau pelaksanaan, sehingga kadang-kadang sebelum digunakan Jalan sudah mengalami kerusakan. Lapis keras jalan akan selalu menerima gaya-gaya lalu-lintas dan faktor regional (pengaruh lingkungan).

a. Lalu lintas

Akibat kendaraan yang melewati permukaan jalan, lapis keras akan mengalami dua macam beban kendaraan, yaitu pada saat kendaraan dalam keadaan berhenti (beban statis) dan pada saat kendaraan dalam keadaan bergerak (beban dinamis).

1). Beban Statis

Beban statis terjadi pada saat kendaraan berhenti dalam waktu yang lama pada lapis keras, beban ini menimbulkan gaya tekan vertikal statis pada lapis keras. Semakin besar beban yang bekerja pada permukaan jalan, gaya tekan akan semakin besar pula. Beban ini akan menimbulkan lenturan pada lapis keras, sedangkan besarnya lenturan tergantung pada besarnya beban dan kekakuan lapis keras.

Kekakuan lapis keras dipengaruhi oleh kekakuan bahan, terutama aspal sebagai bahan pengikat lapis keras. Lama pembebanan akan mempengaruhi kekakuan bahan dan lapis keras. Semakin lama kendaraan berada di atas permukaan lapis keras tegangan lentur yang terjadi semakin besar, berarti kekakuan lapis keras makin kecil, sehingga semakin besar deformasi lapis keras akibat beban yang terjadi. Hal ini berkaitan dengan sifat tegangan dan regangan bahan yang dipengaruhi oleh intensitas pembebanan.

Pengaruh beban statis dari kendaraan ini semakin besar jika terdapat sederetan kendaraan yang berhenti pada tempat-tempat tertentu dalam periode waktu yang cukup lama, misalnya pada tempat parkir, persimpangan jalan dengan *traffic light* dan terminal.

2). Beban dinamis

Beban dinamis pada lapis keras terjadi akibat beban lalu-lintas yang bergerak melintasi permukaan jalan. Gaya akibat beban dinamis ini bersifat lebih kompleks dibanding dengan gaya akibat beban statis. Gaya-gaya tersebut dapat berupa gaya vertikal seperti halnya beban statis serta gaya horizontal berupa gaya hisap, gaya pengereman, traksi dan lain sebagainya.

Gaya tekan vertikal yang dialami lapis keras akibat lalu-lintas yang bergerak mempunyai pengaruh yang lebih kecil dibanding dengan gaya vertikal akibat kendaraan dalam keadaan berhenti (beban statis), hal ini disebabkan karena pendeknya waktu pembebanan. Semakin tinggi kecepatan kendaraan, waktu pembebanan semakin rendah, tetapi karena frekuensi pembebanan yang lebih banyak atau terjadi repetisi lenturan berulang-ulang, oleh karena itu dibutuhkan lapis keras yang memiliki fleksibilitas tinggi agar lapis keras tidak mudah mengalami retak.

Kecepatan kendaraan juga dapat menimbulkan gaya tarikan pada lapis keras yang besarnya tergantung pada kecepatan dan dimensi kendaraan, sehingga semakin tinggi kecepatan dan semakin besar dimensi kendaraan semakin besar pula gaya tarikan yang dialami oleh lapis keras.

Pengereman kendaraan mengakibatkan terjadinya gesekan antara roda dan permukaan lapis keras. Akibatnya tahanan gesek (*skid resistance*) lapis keras akan semakin berkurang, akibat adanya pengausan yang disebabkan oleh gesekan roda dengan lapis keras. Dengan berkurangnya *skid resistance* ini akan memudahkan terjadinya penggelinciran pada saat dilakukan pengereman, terutama pada saat permukaan jalan dalam keadaan basah.

Selain berpengaruh pada pengereman tahanan gesek juga mempengaruhi traksi antara roda dan permukaan lapis keras. Pada saat kendaraan bergerak di atas lapis keras akan timbul gaya horizontal yang berlawanan arah dengan arah gerak kendaraan. Traksi antara roda kendaraan dengan lapis keras dipengaruhi oleh tahanan gesek permukaan dan luas bidang kontak antara roda kendaraan dan permukaan lapis keras. Permukaan yang kasar mempunyai tahanan gesek yang tinggi dibanding permukaan yang halus. Sedangkan luas bidang kontak dipengaruhi oleh berat roda kendaraan, tekanan angin roda dan keadaan kebersihan permukaan lapis keras. Gaya horizontal akibat traksi dapat mengakibatkan pengausan permukaan lapis keras menjadi licin dan tahanan gesek berkurang.

Gaya-gaya tersebut akan selalu diterima oleh lapis keras selama lapis keras masih dibuka untuk melayani lalu-lintas, selanjutnya meningkatnya kerusakan akan terjadi akibat adanya gaya-gaya tersebut secara terus menerus. Kerusakan utama akibat lalu-lintas menurut (OECD, 1978) adalah : Retak kelelahan (*fatigue cracking*), usang karena aus atau lepasnya agregat, dan deformasi plastis.

b. Faktor Regional

Faktor regional yang berpengaruh terhadap kerusakan lapis keras meliputi kondisi iklim setempat berupa temperatur udara, curah hujan dan sebagainya, serta kondisi lingkungan antara lain tanah dasar, muka air tanah, bangunan pelengkap dan sebagainya. Pengaruh iklim dan kondisi lingkungan ini akan selalu dialami oleh lapis keras, hal ini disebabkan karena jalan dalam keadaan terbuka.

1). Temperatur Udara

Temperatur udara merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap lapis keras lentur, hal ini disebabkan karena aspal sebagai salah satu bahan utama lapis keras lentur merupakan bahan yang sangat peka terhadap temperatur (*thermoplastic*). Pada saat temperatur tinggi aspal akan bersifat lunak, hal ini akan mengganggu fungsi aspal sebagai bahan ikat agregat, sehingga tahanan ikat aspal menjadi lebih kecil. Dengan demikian nilai stabilitas perkerasan menjadi lebih kecil, sehingga memudahkan terjadi deformasi pada lapis keras saat menerima beban. Temperatur yang tinggi juga akan mempercepat terjadinya penguapan dan oksidasi. Proses penguapan terjadi pada komponen aspal yang ringan (*oils*), sehingga terjadi perubahan perbandingan fraksi komponen aspal yang berarti

akan mengubah sifat aspal dari sifat semula. Dengan menguapnya komponen yang ringan, aspal menjadi lebih mudah mengalami proses pengerasan (*hardening*) dan bersifat getas (*brittle*), sehingga permukaan lapis keras mudah retak. Proses oksidasi akan mengakibatkan adanya lapisan film tipis keras pada permukaan lapis keras yang dapat larut dalam air. Apabila suatu saat terkena air lapisan tersebut akan terlarut dalam air dan apabila terjadi terus-menerus kadar aspal akan berkurang, sehingga dapat mengurangi stabilitas lapis keras. Dengan demikian lapis keras akan mudah mengalami retak.

2). Curah hujan

Curah hujan berpengaruh terhadap kadar air lapis keras maupun tanah dasar. Seperti uraian diatas, adanya air pada permukaan lapis keras akan melarutkan lapisan film tipis yang keras pada permukaan lapis keras. Selain itu air akan mengganggu ikatan antara aspal dan batuan apabila berhasil masuk dalam lapis keras karena adanya retak pada bagian lapis keras. Selanjutnya air akan menggusur batuan lepas dari ikatan semula. Jika terdapat aliran air pada permukaan lapis keras yang telah lepas, maka akan dapat mempengaruhi perbandingan material pembentuk lapis keras. Apabila air dapat meresap sampai ke tanah dasar, maka tanah dasar akan mengalami penurunan daya dukung. Kerusakan akibat pengaruh iklim yang sering terjadi adalah: *stripping*, deformasi dan retak khususnya karena pengaruh temperatur, dan turunnya daya dukung tanah dasar karena kandungan air yang terlalu tinggi .

2.2.2. Jenis Kerusakan Lapis Perkerasan dan Penyebabnya

Sebelum menentukan metode Pemeliharaan dan rehabilitasi pada suatu jalan, hal penting yang harus dilakukan lebih dahulu adalah melakukan evaluasi tentang kerusakan-kerusakan yang timbul pada lapis keras baik mengenai jenis kerusakan, tingkat kerusakan, penyebab dan akibat kerusakan tersebut. Kerusakan pada lapis keras dapat diklasifikasikan menjadi dua hal, yaitu berdasarkan:

a. Bentuk dasarnya

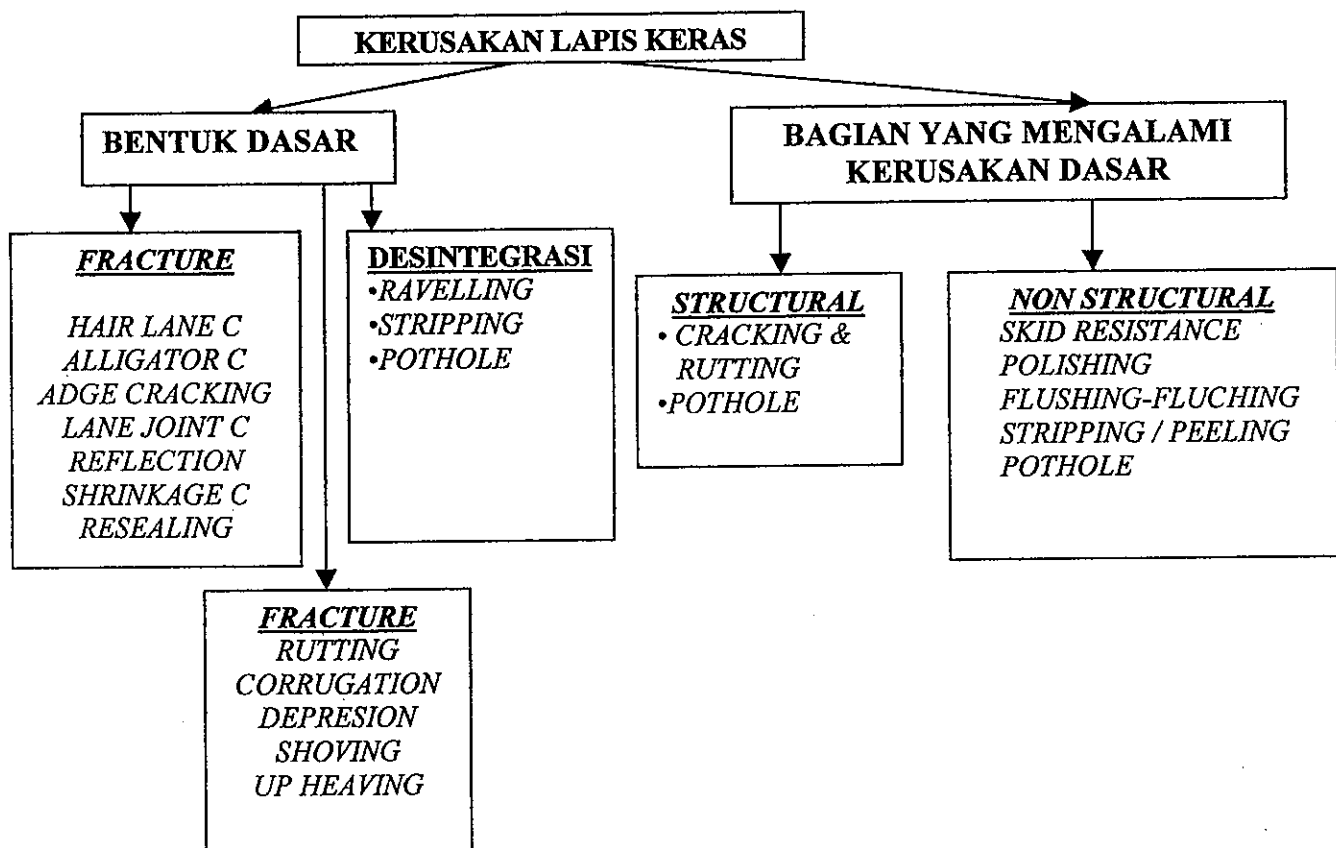
Bentuk dasar kerusakan lapis keras meliputi:

- 1). *Fracture* : terjadi kerusakan kecil pada fraksi aspalnya seperti retak rambut, retak memanjang, retak buaya, penurunan dengan bentuk jejak roda (alur), selip dan sebagainya.
- 2). *Desintegrasi*: terjadi kerusakan yang lebih besar atau agregat lepas dari fraksi aspalnya seperti berlubang, aspal lepas dan sebagainya.

b. Sedangkan bagian yang mengalami kerusakan dasar terbagi dua yaitu:

- 1). Struktur : terjadi retakan dan penurunan, lubang dan sebagainya
- 2). Non-Struktur : terjadi penurunan tahanan gesek (kekesatan), bergelombang, bleding (aspal naik), pengupasan, lubang kecil dan sebagainya.

Selengkapnya kerusakan lapis keras dijelaskan Gambar 2.1 berikut ini.



Catatan : C = Cracking; R = Rutting; F = Function

Gambar 2.1. Skema Kerusakan Lapis Keras (Niluh,1997)

2. 3. Rehabilitasi dan Pemeliharaan Lapis Perkerasan

2.3.1. Pemeliharaan.

Pemeliharaan dan rehabilitasi dapat diklasifikasikan berdasarkan tujuan dan programnya yang biasanya dilaksanakan sesuai dengan kondisi di lapangan yang dibedakan menjadi 2 (dua) kategori, Pemeliharaan Rutin dan Pemeliharaan Berkala

a. Berdasarkan Tujuannya

Berdasarkan tujuannya Pemeliharaan dapat dibagi menjadi dua, yaitu :

1) Pencegahan (*preventive*)

Pemeliharaan dimaksudkan untuk mengurangi tingkat memburuknya jalan dan mencegah terjadinya kerusakan yang lebih parah. serta mempertahankan tingkat keamanan, kenyamanan, kedekatan permukaan dan kelancaran arus lalu-lintas.

Pemeliharaan ini dilakukan secara berkala pada kerusakan-kerusakan yang bersifat ringan dengan tingkat penyebaran luas. Pada umumnya kerusakan berupa kerusakan fungsional atau kerusakan non struktural seperti retak halus, pengausan, kegemukan dan lain-lain cacat permukaan. Pekerjaan pemeliharaan dilakukan pada lapis permukaan tanpa menambah kekuatan. Tambahan pada lapis permukaan dianggap tidak memiliki atau menambah nilai struktural jalan.

2) Pembetulan (*corrective*)

Perbaikan atau pembetulan dilakukan untuk mengembalikan kekuatan jalan, tingkat keamanan, kenyamanan dan kelancaran lalu- lintas. Perbaikan ini bertujuan agar setiap bagian lapis keras jalan mampu menjalankan fungsi strukturalnya menahan beban yang bekerja padanya sesuai dengan yang direncanakan, serta mengembalikan bagian lapis keras yang mengalami kerusakan agar berkemampuan seperti semula.

Tindakan Pemeliharaan ini dilakukan pada bagian lapis keras yang mengalami kerusakan berat. Kerusakan dapat terjadi pada lapis permukaan, lapis fondasi, bahkan sampai ke tanah dasar. Kerusakan yang memerlukan Pemeliharaan ini merupakan kerusakan struktural yang membutuhkan perbaikan untuk menambahkan kemampuan strukturalnya. Perbaikan umumnya mencakup daerah yang terbatas/setempat sesuai dengan tingkat kondisi lapangan. Perbaikan ini dilaksanakan pada lokasi dengan tingkat kerusakan

yang berat antara lain lubang, amblas, alur dan retak bersama-sama dan lain-lain kerusakan struktural lapis keras. Perbaikan kerusakan struktural yang terjadi pada lapis keras dengan tingkat penyebaran yang meluas (seluruh permukaan jalan) sudah bukan termasuk dalam kategori Pemeliharaan lagi tapi merupakan tindakan rehabilitasi yang dapat dilakukan dengan rekonstruksi atau dengan metode daur ulang.

a. Berdasar Programnya

Pemeliharaan berdasarkan programnya dapat diklasifikasikan dalam dua kategori yaitu :

1) Pemeliharaan rutin atau menerus

Pemeliharaan rutin dilakukan secara terus menerus yang meliputi semua pekerjaan Pemeliharaan dan perbaikan yang dilakukan sebagai perawatan jalan. Pekerjaan ini dilakukan untuk mengontrol gangguan atau kerusakan pada lapis keras maupun samping jalan seperti pemotongan rumput, pembersihan endapan dan kotoran pada saluran drainase, tambal lubang dan sebagainya. Aktivitas yang dilakukan termasuk aktivitas kecil, karena bersifat setempat pada tempat dimana terdapat kerusakan jalan.

2) Pemeliharaan berkala atau periodik

Pemeliharaan berkala merupakan tindakan yang telah direncanakan pada saat pembangunan jalan baru. Biasanya berupa pemberian lapis permukaan untuk mempertahankan kualitas permukaan lapis keras khususnya kerataan, *skid resistance*, serta mencegah kerusakan struktur lebih lanjut. Jenis kerusakan yang memerlukan Pemeliharaan berkala (Soedarmanto dan Dardak, 1991):

- a) Lapis permukaan telah mengalami oksidasi,
- b) *Skid resistance* sudah tidak memadai,
- c) Terjadinya *unexpected failure* permukaan lapis keras secara menyeluruh
- d) Lapis permukaan telah mengalami retak rambut secara merata akibat kelelahan (*fatigue*).

Pekerjaan Pemeliharaan berkala umumnya dilakukan pada jalan dengan kondisi mantap pada lingkup dan tujuan pekerjaan sebagai berikut (Soedarmanto dan Dardak, 1991):

- a) Tidak meningkatkan kapasitas struktur
- b) Mengembalikan pada kapasitas struktur semula
- c) Terutama dilakukan pada lapis permukaan
- d) Dimaksudkan agar masa pelayanan yang direncanakan dapat tercapai

2.3.2. Rehabilitasi

Rehabilitasi merupakan tindakan perbaikan pada jalan yang bersifat luas dan tidak termasuk dalam kategori Pemeliharaan (*maintenance*). Perbaikan dapat dilakukan dengan rekonstruksi, pelapisan ulang permukaan lapis keras (*overlay*) dan daur ulang. Rehabilitasi dimaksudkan untuk memulihkan atau memperbaharui karakteristik utama lapis keras seperti stabilitas, kerataan permukaan (*evenness*), kekasaran permukaan (*roughness*), dan profil permukaan atau meningkatkan kemampuan lapis keras untuk melayani perkembangan lalu-lintas. Sehingga tindakan ini disebut juga peningkatan jalan.

Jenis-jenis kerusakan yang memerlukan peningkatan jalan yaitu (Soedarmanto dan Dardak, 1991) :

- a). Lapis permukaan telah mengalami kerusakan merata berupa retak kulit buaya
- b). Struktur lapis keras mempunyai lendutan lebih besar atau sama dengan 1,5 mm
- c). Lapis permukaan mengalami perubahan kerusakan yang relatif cepat (lebih cepat dari yang direncanakan).

Pekerjaan peningkatan jalan pada umumnya dilakukan pada jalan yang tidak mantap atau jalan dengan masa pelayanan yang telah tercapai, dengan lingkup dan tujuan sebagai berikut (Soedarmanto dan Dardak, 1991) :

- a). Meningkatkan kapasitas struktur sesuai tuntutan lalu-lintas
- b). Pada umumnya dilaksanakan pada lapisan permukaan saja (satu atau dua lapis), termasuk lapis fondasi atas dan jarang sekali sampai lapis fondasi bawah
- c). Mencakup keseluruhan permukaan jalan
- d). Dengan target masa pelayanan ± 10 tahun

Tujuan tersebut dapat tercapai dengan pemilihan metode rehabilitasi yang sesuai. Reichert (1977) memberikan beberapa alternatif yaitu :

- a) Membuat kembali (*redoing*) lapis permukaan untuk memperbaiki atau mencegah pengaruh cuaca terhadap permukaan lapis keras,

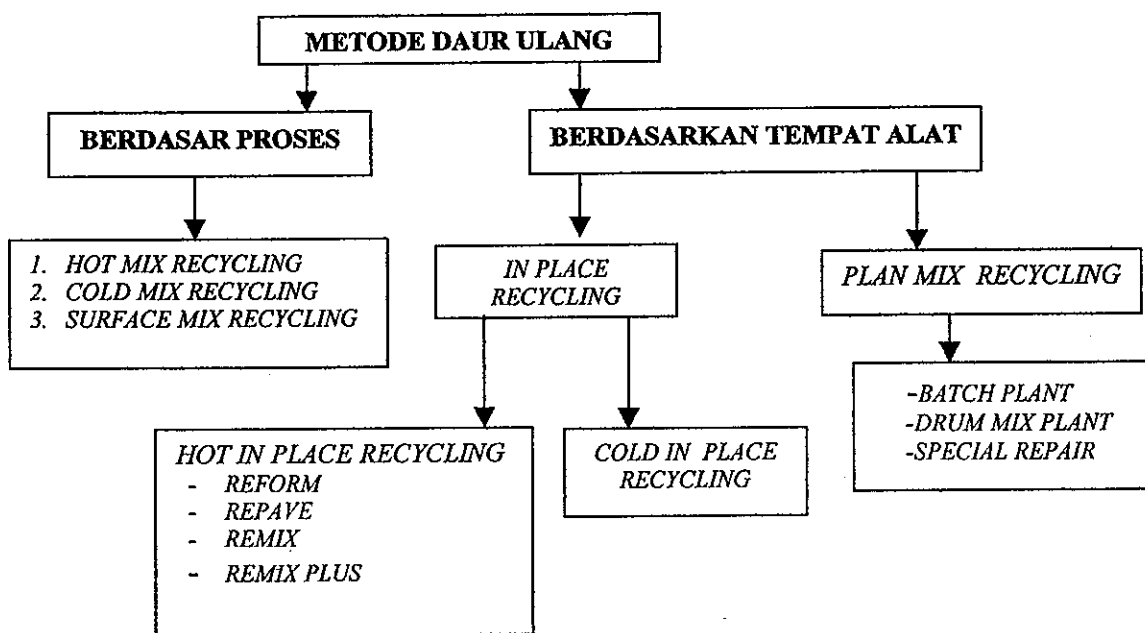
- b) Pemberian lapis permukaan baru di atas lapis keras lama
- c) Membongkar lapis keras yang rusak dan menggantinya dengan lapisan baru
- d) Pelaksanaan dengan teknik *hot in-place recycling*, antara lain dengan mencampur kembali (*remixing*) lapis permukaan lama dengan atau tanpa penambahan bahan *additive* dan menghampar kembali untuk mendapatkan profil yang diinginkan
- e) Pelaksanaan dengan teknik *cold in-place recycling* dan rehabilitasi lapis pondasi.

2. 4. Metode Daur Ulang

Secara garis besar metode daur ulang dapat dibedakan menjadi 2 (dua), yaitu berdasarkan:

- a). Proses
- b). Tempat alat yang digunakan

Lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 2.2 di bawah ini.



Gambar 2.2 Skema Metode Daur Ulang

Pada dasarnya perbaikan lapis keras dengan metode daur ulang dapat dilaksanakan setelah terlebih dahulu dilakukan pemeriksaan awal untuk mengetahui kondisi permukaan lapis keras maupun kondisi material perkerasan. Dari pemeriksaan awal ini akan diketahui metode yang sesuai untuk digunakan dalam teknik daur ulang maupun cara modifikasi

yang harus dilakukan untuk menghasilkan lapis keras daur ulang dengan kualitas dan kuantitas optimal yang direncanakan.

Bahan hasil *core* dari perkerasan, selanjutnya diperiksa dan dievaluasi untuk mengetahui kualitas dan sifat-sifat yang dimiliki. Secara garis besar evaluasi bahan ini di bagi menjadi 3, yaitu : Evaluasi campuran perkerasan lama (*Job Mix Formula Lama*), Evaluasi agregat dan Evaluasi aspal.

2.5. Agregat dan Gradasi

Agregat adalah suatu bahan keras dan kaku yang digunakan sebagai bahan campuran yang berupa berbagai jenis butiran atau pecahan yang termasuk di dalamnya antara lain pasir, kerikil, agregat pecah, terak dapur tinggi.

Sukirman (1999) menyatakan bahwa gradasi atau distribusi partikel-partikel berdasarkan ukuran *aggregate* merupakan hal yang penting dalam menentukan stabilitas perkerasan. Gradasi *aggregate* mempengaruhi besarnya rongga antar butir yang akan menentukan stabilitas dan kemudahan dalam proses pelaksanaan.

2.5.1 Agregat

Shell (1990) mengelompokkan *aggregate* menjadi 3 (tiga), yaitu :

- a. Agregat kasar yaitu batuan yang tertahan di saringan 2,36 mm, atau sama dengan saringan standar *ASTM* No. 8. Dalam campuran agregat - aspal, agregat kasar sangat penting dalam membentuk kinerja karena stabilitas dari campuran diperoleh dari *interlocking* antar agregat.
- b. Agregat halus yaitu batuan yang lolos saringan No. 8 (2,36 mm) dan tertahan pada saringan No. 200 (0,074 mm). Fungsi utama agregat halus adalah memberikan stabilitas dan mengurangi deformasi permanen dari campuran melalui *interlocking* dan gesekan antar partikel.
- c. Mineral pengisi (*filler*) yaitu material yang lolos saringan No. 200 (0,074 mm). *Filler* dapat berfungsi untuk mengurangi jumlah rongga dalam campuran, namun demikian jumlah *filler* harus dibatasi pada suatu batas yang menguntungkan. Terlampaui tinggi kadar *filler* cenderung menyebabkan campuran menjadi getas dan akibatnya akan

mudah retak akibat beban lalu lintas, pada sisi lain kadar *filler* yang terlampau rendah menyebabkan campuran menjadi lembek pada temperatur yang relatif tinggi.

Agregat yang akan digunakan sebagai campuran beton aspal harus memenuhi persyaratan seperti tercantum pada Tabel 2.1, sebagai berikut :

Tabel 2.1. Persyaratan Aggregate

No.	Sifat-sifat	Satuan	Spesifikasi	
			Min.	Maks.
Aggregate Kasar				
1.	Penyerapan air	%	-	3
2.	Berat jenis <i>bulk</i>	gr/cc	2,5	-
3.	Berat jenis jemu	gr/cc	-	-
4.	Berat jenis efektif	gr/cc	-	-
5.	Tes abrasi <i>LOS ANGELES</i>	%	-	40
6.	Indeks kepipihan	%	-	25
7.	Kelekatan dengan aspal	%	95	-
Aggregate Halus				
1.	Penyerapan air	%	-	3
2.	Berat jenis <i>bulk</i>	gr/cc	2,5	-
3.	Berat jenis jemu	gr/cc	-	-
4.	Berat jenis efektif	gr/cc	-	-
5.	<u>Sand equivalent</u>	%	-	40
<u>Filler</u>				
1	Berat jenis	gr/cc	1	-

Sumber : SNI No. 1737-1989-F

2.5.2. Gradasi

Gradasi atau distribusi partikel-partikel berdasarkan ukuran agregat merupakan hal yang penting dalam menentukan stabilitas perkerasan. Gradasi agregat mempengaruhi besarnya rongga antar butir yang akan menentukan stabilitas dalam proses pelaksanaan.

Gradasi agregat dapat dibedakan atas :

- 1) Gradasi seragam (*uniform graded*) adalah agregat dengan ukuran yang hampir sama/sejenis atau mengandung agregat halus yang sedikit jumlahnya sehingga tidak dapat mengisi rongga antar agregat. Gradasi seragam disebut juga gradasi terbuka. Agregat dengan gradasi seragam akan menghasilkan lapisan perkerasan dengan sifat permeabilitas tinggi, stabilitas kurang, berat volume kecil.

- 2) Gradasi rapat, merupakan campuran agregat kasar dan halus dalam porsi yang seimbang, sehingga dinamakan juga agregat bergradasi baik. Gradasi rapat akan menghasilkan lapisan perkerasan dengan stabilitas tinggi, kurang kedap air, sifat drainase jelek dan berat volume besar.
- 3) Gradasi senjang (*gap graded*), merupakan campuran yang tidak memenuhi 2 (dua) kategori di atas. *Aggregate* bergradasi buruk yang umum digunakan untuk lapisan perkerasan lentur merupakan campuran dengan 1 fraksi hilang atau 1 fraksi sedikit. Gradasi seperti ini sering juga disebut gradasi senjang. Gradasi senjang akan menghasilkan lapis perkerasan yang mutunya terletak antara kedua jenis di atas.

Penentuan distribusi ukuran aggregate akan mempengaruhi kekakuan jenis campuran aspal. Gradasi rapat akan menghasilkan campuran dengan kekakuan yang lebih besar dibandingkan gradasi terbuka. Dari segi kelelahan, kekakuan adalah suatu hal yang penting karena akan mempengaruhi tegangan dan regangan yang diderita campuran beraspal panas akibat beban dinamik lalu lintas.

2.5.3. Aspal

Aspal didefinisikan sebagai suatu cairan yang lekat atau berbentuk padat terdiri dari *hydrocarbon* atau turunannya, terlarut dalam *trichloro-ethylene* dan bersifat tidak mudah menguap serta lunak secara bertahap jika dipanaskan. Aspal berwarna coklat tua sampai hitam dan bersifat melekatkan, padat atau semi padat, dimana sifat aspal yang menonjol tersebut didapat dalam atau dengan penyulingan minyak (*Kreb, RD & Walker, RD, 1971*).

Aspal terbuat dari minyak mentah melalui proses penyulingan atau dapat ditemukan dalam kandungan alam sebagai bagian dari komponen alam yang ditemukan bersama-sama material lainnya seperti pada cekungan bumi yang mengandung aspal.

Aspal adalah material yang mempunyai sifat *visco-elastis* dan tergantung dari waktu pembebanan. Pada proses pencampuran dan proses pemadatan sifat aspal dapat ditunjukkan dari nilai viscositasnya, sedangkan pada sebagian besar kondisi saat masa pelayanan aspal mempunyai sifat viscositas yang diwujudkan dalam suatu nilai modulus kekakuan (*Shell Bitumen, 1990*).

AASHTO (1999) menyatakan bahwa jenis aspal keras ditandai dengan angka penetrasi aspal. Angka ini menyatakan tingkat kekerasan aspal atau tingkat konsistensi aspal. Semakin besar angka penetrasi aspal maka tingkat kekerasan aspal semakin rendah, sebaliknya semakin kecil angka penetrasi aspal maka tingkat kekerasan aspal makin tinggi.

Terdapat bermacam-macam tingkat penetrasi aspal yang dapat digunakan dalam campuran *aggregate* aspal antara lain 40/50, 60/70, 80/100. Umumnya aspal yang digunakan di Indonesia adalah penetrasi 80/100 dan penetrasi 60/70.

Aspal pada lapis keras jalan berfungsi sebagai bahan ikat antar agregat untuk membentuk suatu campuran yang kompak, sehingga akan memberikan kekuatan yang lebih besar dari kekuatan agregat. Aspal yang digunakan pada penelitian ini merupakan hasil penyulingan minyak mentah produksi Pertamina.

Aspal merupakan material yang bersifat *visco-elastis* dan memiliki ciri yang beragam mulai dari yang bersifat lekat sampai yang bersifat elastis. Diantara sifat aspal lainnya adalah:

- a. Aspal mempunyai sifat *Rheologic* (mekanis), yaitu hubungan antara tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) dipengaruhi oleh waktu. Apabila mengalami pembebanan dengan jangka waktu pembebanan yang sangat cepat, maka aspal akan bersifat elastis, tetapi jika pembebanannya terjadi dalam jangka waktu yang lambat, sifat aspal menjadi plastis (*viscous*).
- b. Aspal adalah bahan yang *Thermoplastis*, yaitu konsistensinya atau viskositasnya akan berubah sesuai dengan perubahan temperatur yang terjadi. Semakin tinggi temperatur aspal, maka viskositasnya akan semakin rendah atau semakin encer, demikian pula sebaliknya. Dari segi pelaksanaan lapis keras, aspal dengan viskositas yang rendah akan menguntungkan karena aspal akan menyelimuti batuan dengan lebih baik dan merata. Namun pemanasan yang berlebihan terhadap aspal akan merusak molekul-molekul dari aspal, misalnya aspal menjadi getas dan rapuh.
- c. Aspal mempunyai sifat *Thixotropy*, yaitu jika dibiarkan tanpa mengalami tegangan-regangan akan berakibat aspal menjadi mengeras sesuai dengan jalannya waktu.

Pada saat pemadatan dan pencampuran, sifat aspal dapat ditunjukkan dari nilai viskositasnya, sedangkan pada sebagian besar kondisi saat masa layan, aspal mempunyai sifat viskositas yang diwujudkan dalam suatu modulus kekakuan (*Shell*, 1991), sedangkan aspal yang digunakan dalam penelitian ini berupa aspal keras penetrasi 60 / 70 yang memenuhi syarat seperti pada Tabel 2.2. berikut ini :

Tabel 2.2. Persyaratan Aspal Keras Pen 60/70

No.	Sifat-sifat	Pen 60/70		Satuan
		Min.	Maks.	
1.	Penetrasi (25 ⁰ C, 100 gr, 5 detik)	60	79	0,1 mm
2.	Titik lembek (<i>ring and ball test</i>)	48	58	⁰ C
3.	Titik nyala (<i>Cleveland open cup</i>)	200	-	⁰ C
4.	Kehilangan berat (163 ⁰ C, 5 jam)	-	0,8	% berat
5.	Kelarutan (C ₂ HCL ₃)	99	-	% berat
6.	Daktilitas (25 ⁰ C, 5 cm/menit)	100	-	Cm
7.	Pen setelah kehilangan berat	54	-	% asli
8.	Daktilitas setelah kehilangan berat	50	-	Cm
9.	Berat jenis (25 ⁰ C)	1	-	Gr/cm ³

Sumber : Departemen Pekerjaan Umum, 1989 (SNI No. 1737-1989-F)

2.6. Persyaratan Perencanaan Campuran Beraspal Panas

Perencanaan campuran mencakup kegiatan pemilihan dan penentuan proporsi material untuk mencapai sifat-sifat akhir dari campuran aspal yang diinginkan (*The Asphalt Institute 1993*). Tujuan dari perencanaan campuran aspal adalah untuk mendapatkan campuran efektif dari gradasi agregat dan aspal yang akan menghasilkan campuran aspal yang memiliki sifat-sifat campuran sebagai berikut :

1. Stabilitas adalah kemampuan campuran aspal untuk menahan deformasi permanen yang disebabkan oleh lalu lintas, baik beban yang bersifat statis maupun dinamis sehingga campuran akan tidak mudah aus, bergelombang , melendut, bergeser dan lain-lain.
2. Fleksibilitas adalah kemampuan campuran aspal untuk menahan terhadap defleksi akibat beban lalu lintas tanpa mengalami keretakan yang disebabkan oleh :

- a. Beban yang berlangsung lama yang berakibat terjadinya kelelahan pada lapis pondasi atau pada tanah dasar yang disebabkan oleh pembebanan sebelumnya.
 - b. Lendutan berulang yang disebabkan oleh waktu pembebanan lalu lintas yang berlangsung singkat.
 - c. Adanya perubahan volume campuran.
3. Durabilitas adalah kemampuan campuran aspal untuk mempertahankan kualitasnya dari disintegrasi atas unsur-unsur pembentuknya yang diakibatkan oleh beban lalu lintas dan pengaruh cuaca. Campuran aspal harus mampu bertahan terhadap perubahan yang disebabkan oleh :
 - a. Proses penuaan pada aspal dimana aspal akan menjadi lebih keras. Hal ini disebabkan oleh pengaruh oksidasi dari udara dan proses penguapan yang berakibat akan menurunkan daya lekat dan kekenyalan aspal.
 - b. Pengaruh air yang menyebabkan kerusakan atau kehilangan sifat lekat antara aspal dan material lainnya.
4. *Impermeability* adalah campuran aspal harus bersifat kedap air untuk melindungi lapisan perkerasan di bawahnya dari kerusakan yang disebabkan oleh air yang akan mengakibatkan campuran menjadi kehilangan kekuatan dan kemampuan untuk menahan beban lalu lintas.
5. *Skid Resistance* adalah kekesatan lapisan permukaan yang akan berkaitan dengan kemampuan permukaan lapis keras tersebut untuk melayani arus lalu lintas kendaraan yang lewat di atasnya tanpa terjadi *skidding slipping* pada saat kondisi permukaan basah.
6. Pemadatan adalah proses pemampatan yang memberikan volume terkecil, menggelincir rongga sehingga batas yang disyaratkan dan menambah kepadatan optimal. Mengingat efek yang timbul oleh pengaruh udara, air serta pembebanan oleh arus lalu lintas apabila rongga dalam campuran tidak memenuhi syarat yang ditentukan, hal ini harus dihindari supaya tidak terjadi penyimpangan. Pada pelaksanaan pemadatan dilapangan sangat rawan akan terjadinya penyimpangan, baik alat-alat yang digunakan tidak sesuai standar yang ditetapkan maupun jumlah lintasannya. Miftahul Fauziah, (2001) menyatakan bahwa sifat fisik maupun

mekanis campuran aspal sangat dipengaruhi oleh teknik pemadatan benda uji, untuk itu pemilihan teknik pemadatan laboratorium berpengaruh sangat nyata terhadap campuran aspal sebagai bahan pembentuk lapis perkerasan jalan. Pemadatan pada hakekatnya adalah untuk memperluas bidang sentuh antar butiran, sehingga mempertinggi *internal friction* yaitu gesekan antar butiran agregat dalam campuran. Pemadatan merupakan suatu upaya untuk memperkecil jumlah *VIM*, sehingga memperoleh nilai struktural yang diharapkan.

7. Temperatur pemadatan merupakan faktor penting yang mempengaruhi pemadatan, kepadatan hanya bisa terjadi pada saat aspal dalam keadaan cukup cair sehingga aspal tersebut dapat berfungsi sebagai pelumas. Jika aspal sudah dalam keadaan cukup dingin maka kepadatan akan sulit dicapai. Sartono (1990) menyatakan bahwa temperatur campuran beraspal panas merupakan satu-satunya faktor yang paling penting dalam pemadatan, disebabkan temperatur pada saat pemadatan sangat mempengaruhi viscositas aspal yang digunakan dalam campuran beraspal panas. Apabila temperatur pada saat pemadatan rendah, mengakibatkan viscositas aspal menjadi tinggi dan membuat sulit dipadatkan. Menaikkan temperatur pemadatan atau menurunkan viscositas aspal berakibat partikel agregat dalam campuran beraspal panas dapat dipadatkan lebih baik lagi. Sartono (1990) menyatakan bahwa *density* pada saat pemadatan campuran beraspal panas terjadi pada suhu lebih tinggi dari 275° F (135° C). *Density* menurun dengan cepat ketika pemadatan dilakukan pada suhu lebih rendah.
8. *Workability* adalah campuran agregat aspal harus mudah dikerjakan saat pencampuran, penghamparan dan pemadatan, untuk mencapai satuan berat jenis yang diinginkan tanpa mengalami suatu kesulitan sampai mencapai tingkat pemadatan yang diinginkan dengan peralatan yang memungkinkan.

2.7. Metoda Pengujian *Marshall Test*.

Konsep dasar dari metoda *Marshall* dalam campuran aspal dikembangkan oleh *Bruce Marshall*, seorang insinyur bahan aspal bersama-sama dengan *The Mississippi State Highway Department*. Kemudian *The U.S. Army Corp of Engineers*, melanjutkan penelitian dengan intensif dan mempelajari hal-hal yang ada kaitannya, selanjutnya meningkatkan dan menambah kelengkapan pada prosedur pengujian *Marshall* dan pada

akhirnya mengembangkan kriteria rancangan campuran pengujiannya, kemudian distandarisasikan didalam *American Society for Testing and Material 1989 (ASTM d-1559)*.

Dua parameter penting yang ditentukan dalam pengujian tersebut, seperti beban maksimum yang dapat dipikul benda uji sebelum hancur atau *Marshall Stability* dan deformasi permanen dari sampel sebelum hancur, yang disebut *Marshall Flow*, serta turunan dari keduanya yang merupakan perbandingan antara *Marshall Stability* dengan *Marshall Flow* yang diebut dengan *Marshall Quotient*, yang merupakan nilai kekakuan berkembang (*speudo stiffness*), yang menunjukkan ketahanan campuran beraspal terhadap deformasi permanen (*Shell, 1990*).

Pada sebagian besar agregat, daya ikat terhadap air jauh lebih besar jika dibandingkan terhadap aspal, karena air memiliki *wetting power* yang jauh lebih besar dari aspal. Keberadaan debu yang berlebihan pada agregat juga akan berakibat kegagalan pengikatan ataupun berakibat munculnya potensi kehilangan daya ikat campuran beraspal. (*Hunter, 1994*).

Uji perendaman *Marshall (Marshall Immersion Test)* merupakan uji lanjutan dari uji *Marshall* sebelumnya, dengan maksud mengukur ketahanan daya ikat/adhesi campuran beraspal terhadap pengaruh air dan suhu (*water sensitivity and temperature susceptibility*). Ada beberapa cara yang digunakan untuk menilai tingkat durabilitas campuran beraspal, salah satunya adalah dengan mencari Indeks Stabilitas Sisa (ISS)/ *Marshall Retained Strenght Index* atau dengan cara lain yaitu dengan menghitung Indeks Penurunan Stabilitas. Perbedaan keduanya adalah dasar perbandingan dari variasi lamanya perendaman dalam alat *waterbath*. Prosedur pengujian durabilitas mengikuti rujukan SNI M-58-2990.

2.8. Hipotesis

Perlakuan daur ulang pada bahan bongkaran Beton Aspal dari objek penelitian diperkirakan oleh peneliti akan memperoleh hasil sebagai berikut:

- a. Mengalami perubahan sifat-sifat fisik beton aspal pada Gradasi Agregat karena pengaruh repetisi beban kendaraan pada masa layanan selama 3 tahun.
- b. Aspal akan mengalami pengerasan karena unsur hidrokarbonnya dan faktor cuaca serta umur yang dialami.

2.7. Hasil Penelitian Yang Relevan

Sampai saat ini telah banyak penelitian berkaitan dengan daur ulang aspal antara lain :

1. **Niluh (1997)** telah melakukan Studi dengan penelitian laboratorium untuk mengamati perubahan sifat-sifat fisik dari bahan utama pembentuk perkerasan beton aspal yaitu aspal dan agregat akibat pengaruh daur ulang. Untuk bahan uji dipergunakan bahan bongkaran dari ruas jalan arteri Kyai Mojo Sleman Yogyakarta, yang mempergunakan lapisan beton aspal sebagai pelapisan ulang tahun 1993/1994. Dari hasil penelitian laboratorium dan data sekunder berupa *job mix formula* beton aspal ruas jalan Kyai Mojo tahun 1993/1994 dianalisis dan dibahas dengan literatur dan dasar teori yang ada.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan *nominal size* agregat dari 2 cm menjadi 1 cm, abrasi dari 22,1 % menjadi 38,5 % (mendekati 40%) dan soundness meningkat dari 2,1 % menjadi 5,64% (lebih dari 5%) . Sedangkan aspal mengalami perubahan penetrasi dari 84,9 menjadi 58,9 dan daktilitas dari >100 cm menjadi 87,5 cm. Perubahan sifat-sifat fisik dari bahan utama pembentuk perkerasan beton aspal tersebut masih berada dalam batas standar spesifikasi. Dengan modifikasi agregat, campuran yang terbentuk karakteristiknya masih memenuhi spesifikasi untuk lapisan atas.

2. **Joewono Prasetyo dan Rini Handayani (2000)** melakukan penelitian tentang kekuatan modulus elastisitas terhadap nilai ketebalan *overlay*. Perancangan lapis tambahan (*overlay design*) merupakan ketebalan dari aspal atau lapisan butir yang akan melapisi perkerasan yang ada, sebagai usaha dalam mengatasi penurunan kekuatan perkerasan serta melindungi struktur selama periode desain. Selama beberapa tahun, dalam menentukan besarnya lapis tambahan aspal untuk perkerasan lentur, didasarkan pada besarnya lapis tambahan aspal untuk perkerasan lentur, didasarkan pada besarnya lendutan yang terjadi. Data lendutan tersebut didapat dari pengukuran dengan alat Benkelman Beam pada suatu standar pembebanan tertentu. Sedangkan jalan yang diambil dalam studi kasus ini adalah salah satu jalan di Propinsi Kalimantan Barat, yaitu jalan Tanjung – Balai Karangan. Berdasarkan beberapa prosedur perencanaan lapis tambahan, seperti misalnya dengan Metode Empirik dengan prosedur dari Bina Marga memberikan hasil (ketebalan *overlay*) yang sangat bervariasi, selain itu juga digunakan metode

dengan cara kekuatan elemen bahan/material, khususnya dengan menonjolkan angka Modulus Elastisitas bahan atau lebih dikenal dengan Metode Mekanik dengan prosedur dari TRRL yang memberikan hasil yang relatif seragam dan lebih besar dari cara empirik. Untuk itu penelitian ini dimaksudkan untuk melihat sejauh mana perbedaan hasil dari kedua metode tersebut dan bagaimana peranan nilai kekuatan bahan secara individu (modulus elastisitas bahan) terhadap ketebalan lapis tambahan (*overlay*).

Dari beberapa seksi jalan yang dibagi, maka didapat hasil untuk prosedur Bina Marga dari seksi I–V berturut-turut tebal *overlay*-nya 3 cm, 7 cm, 8 cm, 11 cm, 8 cm, sedangkan untuk prosedur TRRL berturut-turut didapat hasil 8 cm, 10 cm, 11 cm, 12 cm, 11 cm. Hal ini sebagai dampak dari beberapa perbedaan parameter yang digunakan. Sedangkan tingkat keefektifan dari setiap material *overlay* dalam mereduksi defleksi dapat diukur dengan membandingkan tebalnya dengan tebal dari material standar yang diperlukan untuk mendapatkan hasil yang sama, dalam hal ini yang dimaksud adalah granular material untuk base CGRA. Perbandingan dari masing-masing ketebalan disebut sebagai “Faktor Ekuivalen” (FE) dari material *overlay*. Dalam hal ini TRRL menggunakan faktor ekuivalen berkisar antara 3.0 – 4.0, sedangkan untuk Bina Marga menggunakan angka kisaran 2.0 – 3.0, sehingga besarnya faktor ekuivalen ini juga mempengaruhi tebal *overlay* yang dihasilkan TRRL lebih besar dari Bina Marga.

3. **Russ Bona Frazila (2000)**, meneliti tentang Pemanfaatan Limbah untuk Campuran Beraspal. Campuran panas (atau lebih dikenal dengan *hotmix*) cukup banyak digunakan khususnya untuk lapis perkerasan jalan mutu tinggi. Saat ini sudah banyak penelitian yang dikembangkan dengan menggunakan campuran panas, terutama jenis Laston (Lapisan Aspal Beton atau AC, *Asphaltic Concrete*) dan HRA (*Hot Rolled Asphalt*). Komponen kedua campuran tersebut adalah agregat kasar, agregat halus, bahan pengisi (*filler*) dan aspal minyak sebagai pengikat. Untuk agregat kasar dan halus, biasanya digunakan batu pecah dengan gradasi yang sesuai dengan persyaratan. Sedangkan untuk *filler* digunakan abu batu, kapur atau semen. Perkembangan teknologi bahan saat ini telah mendorong banyak penelitian untuk mencoba menggunakan material lain sebagai komponen campuran atau tambahan (*additive*). Salah satu yang sedang dikembangkan saat ini, adalah penelitian tentang pemanfaatan limbah sebagai bahan perkerasan jalan. Sebagai

alternatif agregat kasar, telah diteliti penggunaan limbah pengujian sampel beton. Sedangkan untuk agregat halus, telah dilakukan penelitian dengan menggunakan slag timah, limbah penambangan timah. Selain itu, telah banyak dilakukan penelitian tentang penggunaan limbah sebagai bahan filler, yang antara lain adalah dengan abu tempurung kelapa dan limbah karbit. Penelitian khusus tentang bahan tambahan dalam campuran beraspal juga telah dilakukan dengan menggunakan serbuk gergajian bambu dan sabut kelapa. Pengamatan kinerja perkerasan yang menggunakan bahan limbah dilakukan melalui nilai stabilitas dan durabilitas. Secara umum kinerja yang ditunjukkan memberikan harapan yang baik untuk dikembangkan lebih lanjut. Untuk aplikasi penggunaan limbah dalam konstruksi perkerasan jalan perlu pengkajian tambahan, khususnya masalah ketersediaannya. Hal ini perlu agar tidak terjadi, limbah sebagai hasil sampingan, karena peningkatan kebutuhan, menjadi tujuan kegiatan produksi.

Persamaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya antara lain:

- a. Penelitian ini juga meneliti sifat-sifat fisik dari suatu daur ulang bahan bongkaran aspal yang digunakan kembali untuk overlay (sama seperti penelitian Niluh, 1997)
- b. Penelitian terkait dengan pelapisan ulang (*overlay*). Aspal beton menggunakan campuran bahan bongkaran (persamaannya pada pelapisan ulang (*overlay*) dari Joewono P dan Rini Handayani, 2000)
- c. Bahan dan proses alternatif campuran aspal untuk periode desain tertentu merupakan inovasi untuk memperoleh efisiensi *overlay* (sejalan dengan penelitian Russ Bona Frizila ,2000)

Sedangkan perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya adalah:

- a. Bahan bongkaran aspal diambil dari lokasi yang berbeda yaitu dari Jalan Gajahmada Tegal. Sehingga untuk lokasi penelitian ini belum pernah dilakukan uji laboratorium daur ulang pada bahan bongkaran aspalnya.
- b. Jenis bahan campuran aspal beton untuk *overlay* dan hasil uji *Marshall*
- c. Analisa spesifikasi bahan bongkaran pada penelitian ini difokuskan pada spesifikasi eksisting dengan Spesifikasi No.X Bina Marga Tahun 1987. Oleh karena itu diharapkan melalui penelitian ini diperoleh informasi ilmiah untuk pengembangan teknologi daur ulang aspal di masa mendatang.

BAB III

METODE PENELITIAN

3. 1. Umum

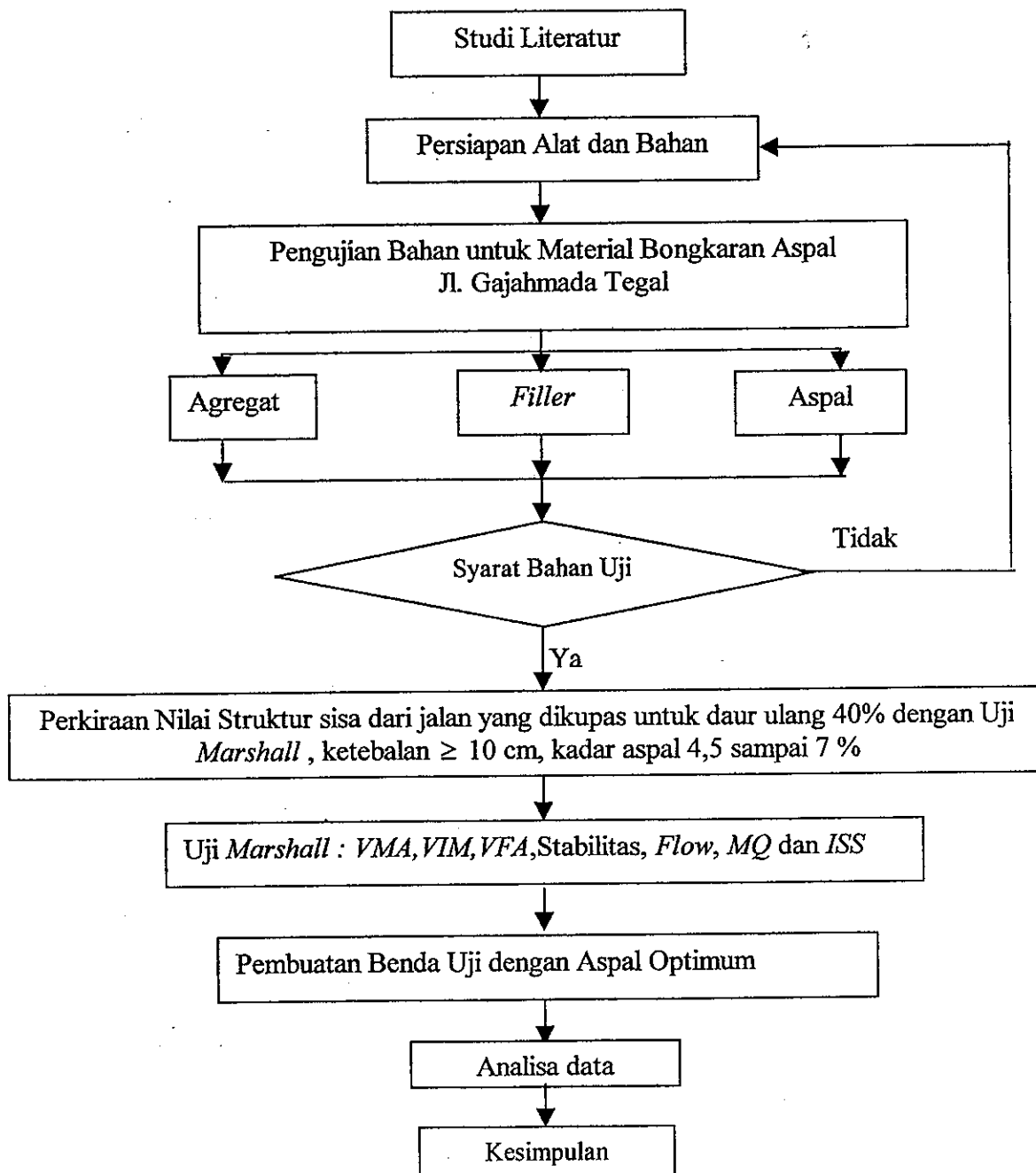
Penelitian ini dilakukan di laboratorium dengan dasar menggunakan metode pengujian mengacu kepada Standar Nasional Indonesia (SNI), Petunjuk Pelaksanaan Lapis Aspal Beton untuk Jalan Raya, SKBI. 2.4.26.1987, maupun pada metode *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*.

Dalam penelitian ini, pengujian dilakukan secara bertahap, yaitu terdiri atas:

- a. Pengujian sifat-sifat bahan (agregat kasar, agregat halus, *filler* dan aspal), hal ini dilakukan agar diperoleh bahan-bahan yang memenuhi spesifikasi, yang terdiri dari pemeriksaan agregat meliputi pemeriksaan berat jenis, pengujian *Los Angeles*, kelekatan terhadap aspal, penyerapan air, indek kepipihan, *sand equivalent*, dan pemeriksaan *soundness*. Untuk pengujian aspal terdiri atas pengujian berat jenis, penetrasi, daktilitas, pengujian titik lembek, titik nyala, titik bakar, pengujian kehilangan berat, kelarutan aspal dalam *CCL₄*, ekstraksi dari bahan bongkaran aspal dari konstruksi aspal beton eks. Jalan Gajah Mada Tegal.
- b. Pengujian tahap pertama yaitu untuk mencari kadar aspal optimum, dalam pengujian ini dibuat 20 benda uji terdiri dari 10 benda uji untuk keperluan pengujian standar dan 10 (sepuluh) benda uji untuk keperluan pengujian perendaman dengan kadar aspal bervariasi, dari beberapa kadar aspal tersebut dapat ditentukan kadar aspal optimumnya. Pengujian tahap pertama menggunakan metoda *Marshall test*, dimana akan didapat sifat-sifatnya terdiri atas analisis kerapatan dan rongga campuran antara lain, berat jenis maksimum teoritis campuran, *VMA*, *VIM*, *VFA*, dan absorpsi. Hasil pengujian benda uji terdiri atas stabilitas, *flow*, *MQ*, dan Indek Kekuatan Remdaman *Marshall*.
- c. Pengujian tahap kedua yaitu membuat desain campuran dengan kadar aspal optimum yang diperoleh berdasarkan pengujian tahap pertama, kemudian dilakukan pengujian berdasarkan metoda *Marshall test* dengan variasi kadar aspal baru dan kadar aspal hasil daur ulang ditetapkan, dan menggunakan agregat lama (bongkaran aspal) serta agregat baru.

3. 2. Bagan Alir Penelitian

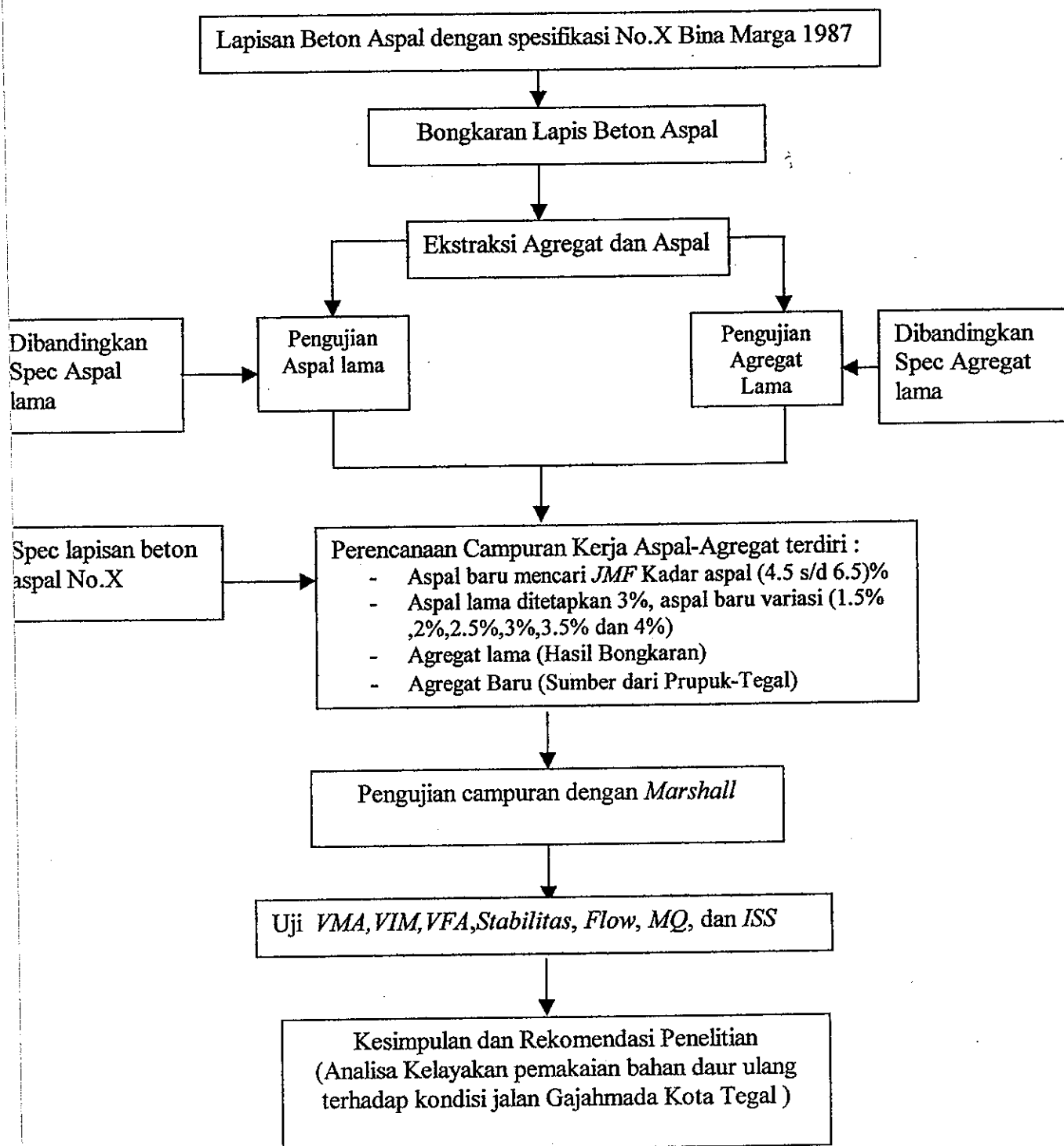
Bagan alir pelaksanaan penelitian di Laboratorium Pelaksanaan dilakukan dalam beberapa tahapan yaitu pemeriksaan bahan (agregat ,aspal), penentuan gradasi campuran (target gradasi) dan pembuatan resep campuran , pengujian *Marshall*, dan secara skematis dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Tahapan Penelitian

3. 3. Metode Analisis Hasil Penelitian

Gambar 3.2 berikut ini adalah skema metode analisa hasil penelitian :



Gambar 3.2 Skema Analisis Hasil Penelitian

3. 4. Sumber Data

Penelitian ini menggunakan dua sumber data yaitu Data Laboratorium sebagai data primer dan data spesifikasi teknis eksisting sebagai data sekunder.

3.4.1. Data Laboratorium

Data Laboratorium yang akan digunakan adalah beberapa hasil pengujian material. Berikut adalah jenis data dan standarnya:

a. Pemeriksaan Bahan

Pemeriksaan yang dilaksanakan pada penelitian ini, meliputi pemeriksaan terhadap agregat kasar, agregat halus, *filler* dan aspal. Tujuan pemeriksaan bahan ini adalah untuk mengetahui apakah bahan yang digunakan dalam campuran aspal seperti agregat dan aspal telah memenuhi syarat yang telah ditetapkan. Sedangkan spesifikasi yang digunakan pada penelitian ini bersumber dari Standar Nasional Indonesia (SNI), *AASHTO*, lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 3.1. Spesifikasi pengujian bahan agregat

No.	Karakteristik	Metode Pengujian	Satuan	Spesifikasi	
				Min.	Maks.
I	Agregat Kasar				
1	Gradasi	RSNI Bina Marga 1999	mm		
2	Berat Jenis Curah	SNI-M 09-1989-F	gr/cc	2,5	-
3	Berat Jenis SSD	SNI-M 09-1989-F	gr/cc	-	-
4	Berat Jenis Semu	SNI-M 09-1989-F	gr/cc	-	-
5	Penyerapan Air	SNI-M 09-1989-F	%	-	3
6	Abrasi Los Angeles	SNI-M-02-1990-F	%	-	40
7	Kelekatan Agregat Terhadap Aspal	SNI-M-28-1990-1	%	95	-
8	<i>Sand Equivalent</i>	AASHTO T-84-1974	%	50	-
9	<i>Soundness test</i>	AASHTO T-104-1977	%	-	7
II	Agregat Halus				
1	Gradasi	RSNI Bina Marga 1999	mm	-	-
2	Berat Jenis Curah	SNI-03-1970-1990-F	gr/cc	2,5	
3	Berat Jenis SSD	SNI-03-1970-1990-F	gr/cc	-	-
4	Berat Jenis Semu	SNI-03-1970-1990-F	gr/cc	-	-
5	Penyerapan Air	SNI-03-1970-1990-F	%	-	3
6	<i>Sand Equivalent</i>	AASHTO T-84-1974	%	50	
III	<i>Filler</i>				
1	Berat Jenis Curah	SNI-15-2531-1991	gr/m ³	1	-

Sumber: Spesifikasi Teknik Bina Marga (1983, P3TN (1993))

Persyaratan pengujian aspal jenis AC 60-70 seperti tertera dalam Tabel 3.2 berikut ini.

Tabel 3.2. Persyaratan untuk aspal

No	Jenis Pemeriksaan	Metode pengujian	Spesifikasi		Satuan
			Min	Max	
1	Penetrasi (25°C, 5 detik)	AASHTO T-96-1974	60	79	0.1 mm
2	Titik Lembek (ring and ball)	SNI M-20-1990-F	48	58	°C
3	Titik nyala (Cleveland open cup)	SNI M-19-1990-F	200	-	°C
4	Titik bakar	SNI M-19-1990-F	-	-	°C
5	Kehilangan Berat (163°C, 5 jam)	AASHTO T-96-1974	-	0.4	% berat
6	Kelarutan CCL ₄	AASHTO T-96-1974	99	-	% berat
7	Daktilitas (25°C, 5 cm/menit)	AASHTO T-51-1974	100	-	Cm
8	Penetrasi setelah kehilangan berat	AASHTO T-96-1974	54	-	% semula
9	Berat jenis (25°C)	SNI M-30-1990-F	1	-	gr/cc

Sumber: Spesifikasi Teknik Bina Marga (1987), P3TN (1993)

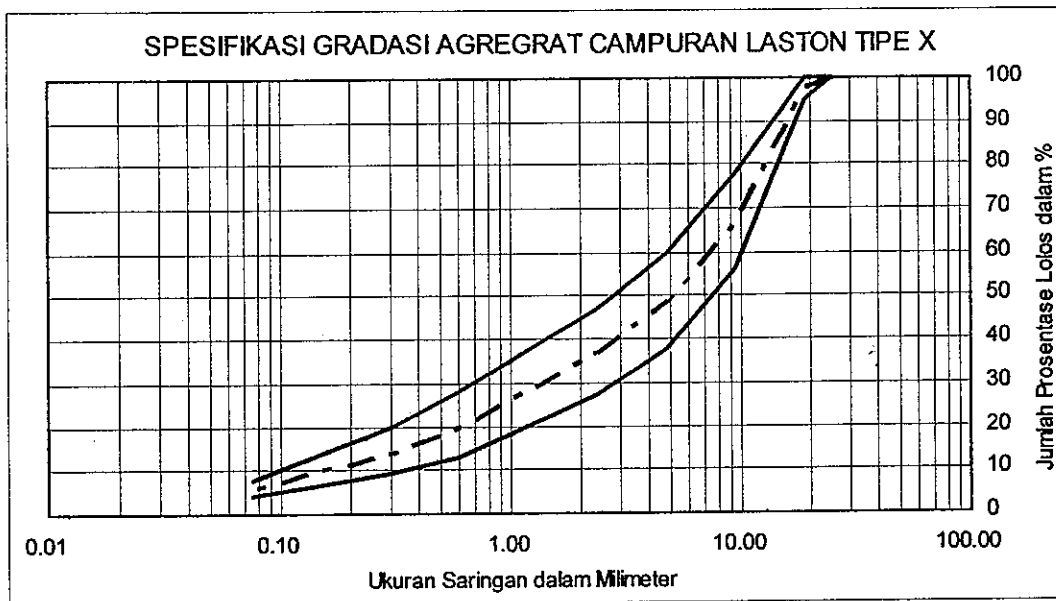
b. Perencanaan Campuran Beton aspal Laston No. X

Gradasi agregat campuran beton aspal yang digunakan pada penelitian ini sesuai dengan persyaratan dan petunjuk Pelaksanaan Lapis Aspal Beton untuk Jalan Raya, SKBI. 2.4.26.,UDC : 626.75 (02) 1987, tahun 1987 seperti ditunjukkan pada Tabel 3.3. dan Gambar 3.3.

Spesifikasi yang digunakan Gradasi Campuran Aspal Beton No. X, ditunjukkan pada Tabel 3.3 dan Gambar 3.3. berikut ini:

Tabel 3.3 Gradasi Campuran Lapis Aspal Beton (laston) No.X

Ukuran Ayakan		Spesifikasi No X % Berat yang Lolos	Gradasi rencana % Berat yang Lolos
ASTM	mm		
1 ½ "	38,1	-	-
1"	25,4	100	100
¾ "	19,1	97	95-100
½ "	12,7	-	-
3/8 "	9,52	67	56-78
No. 4	4,76	49	38-60
No. 8	2,38	37	27-47
No.30	0,59	20	13-28
No.50	0,279	14	9-20
No.100	0,149	-	-
No. 200	0,074	6	4-8



Gambar 3.3. Spesifikasi Gradasi campuran Laston No. X

3.4.2. Data Sekunder

Data Sekunder yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- 1). *Job Mix Formula* untuk Ruas Jalan Gajahmada Tegal Tahun 1999/2000
- 2). Spesifikasi Material Eksisting (sebelum daur ulang) untuk Ruas Jalan Gajahmada, Tegal

3. 5. Bahan dan Alat

3.5.1. Bahan-bahan

Bahan-bahan yang digunakan untuk uji laboratorium adalah:

- a. Bahan bongkaran aspal beton ruas Jalan Gajahmada Kota Tegal
- b. CCl_4 (Pelarut aspal)
- c. Agregat halus dan Agregat kasar baru dari lokasi Prupuk-Tegal
- d. Aspal Curah pen 60/70 (Pertamina)

3.5.2. Alat-alat

a Alat pengujian agregat dan filler

Alat yang digunakan untuk pengujian agregat antara lain mesin *Los Angeles*, saringan standar, alat pengering (*oven*), timbangan berat, alat uji berat jenis (*piknometer*,

timbangan, pemanas), bak perendam dan tabung *sand equivalent*, alat saringan uji *soundness*

b. Alat pengujian aspal

Alat yang digunakan untuk pengujian aspal antara lain alat uji penetrasi, alat uji titik lembek, alat uji titik nyala dan titik bakar, alat uji daktilitas, alat uji berat jenis (*piknometer* dan timbangan), dan alat uji kelarutan.

c. Alat pengujian campuran metode *Marshall*

1). Alat tekan Marshall yang terdiri dari:

- a) kepala penekan yang berbentuk silinder
- b) cincin penguji yang berkapasitas 2500 kg (5000 *pound*) dengan ketelitian 12,5 kg (25 *pound*) dengan arloji tekan dengan ketelitian 0,0025 cm (0,0001)
- c) arloji penunjuk kelelahan dengan ketelitian 0,25 mm (0,01") dengan perlengkapan.

2) Cetakan benda uji berbentuk silinder berdiameter 10 cm (4") dan tinggi 7,5 cm lengkap dengan plat atas dan leher sambung.

3) Ejector untuk mengeluarkan benda uji dari cetakan setelah dipadatkan.

4) *Oven* untuk memanaskan bahan sampai suhu yang diinginkan.

5) Alat penumbuk (*compactor*) yang mempunyai permukaan tumbuk rata berbentuk silinder dengan berat 4,536 kg dan tinggi jatuh bebas 45,7cm.

6) Bak perendam (*water bath*) dilengkapi pengatur suhu minimum 20 °C.

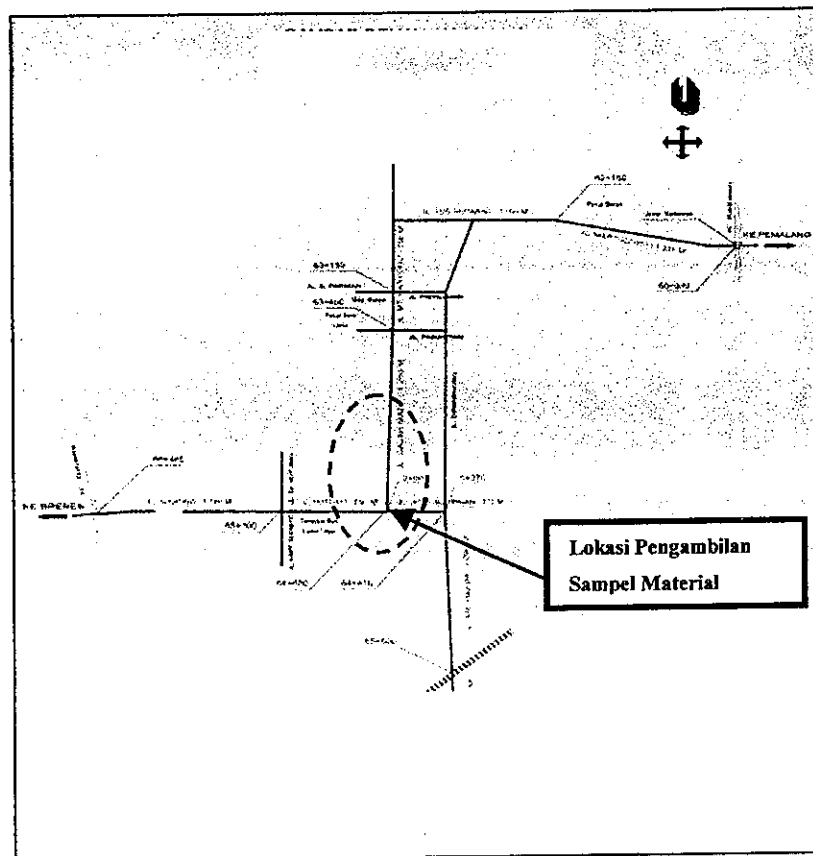
7) Perlengkapan-perengkapan lain seperti:

- a) panci untuk memanaskan bahan dan campuran,
- b) kompor pemanas dengan kapaitas 600 watt,
- c) termometer berkapasitas, 400°C
- d) sendok pengaduk
- e) spatula
- f) timbangan dengan ketelitian 0,01 gram
- g) sarung tangan karet
- h) kipas angin
- i) perlengkapan lainnya.

3. 6. Rencana Penelitian

3.6.1. Pengambilan Sampel Uji

Pengambilan bahan perkerasan lama beton aspal diperoleh dari hasil pengupasan perkerasan jalan Aspal di Jalan Gajahmada Kota Tegal pada STA 0+000 sepanjang 100 meter (sekitar 8% dari panjang total ruas jalan 1250 meter) dengan alat *cold milling*. Lokasi pengupasan sampel dimulai dari pertigaan jalan dari Jalan Sutoyo, Jalan Jend. Sudirman dan Jalan Gajahmada. Peta Lokasi Jalan Kota Tegal seperti disajikan pada Gambar 3.4 berikut.



Gambar 3.4 Peta Jalan Kota Tegal dan Lokasi Pengambilan Sampel

Kegiatan pengupasan perkerasan jalan Aspal dan alat pengupas sampel uji laboratorium *cold milling* dan pengangkut hasil kupasan dengan *dump truck* dapat dilihat pada Gambar 3.5 berikut ini.



Gambar 3.5. Kegiatan Pengupasan Sampel Uji Laboratorium dengan *Cold Milling*

3.6.2. Perencanaan Campuran Aspal Panas Laston AC

Karakteristik campuran aspal panas berdasarkan kinerja (*performance based properties*) adalah karakteristik campuran yang berhubungan dengan respon perkerasan terhadap beban. Setelah sasaran kinerja tertentu didefinisikan, maka target karakteristik campuran dapat ditetapkan, atau sebaliknya dengan mengetahui karakteristik campuran maka kinerja perkerasan dapat diperkirakan.

Jenis campuran yang akan digunakan untuk pembuatan benda uji adalah campuran aspal panas agregat aspal dari hasil daur ulang bongkaran aspal Jalan Gajahmada ditambah agregat baru dari Base Camp AMP PT Bumi Redjo Prupuk dan aspal *recycling* ditetapkan 3 % untuk Laston AC. Berdasarkan hasil analisis saringan maka ditentukan berat ukuran agregat dengan persentase yang telah ditetapkan terlebih dahulu dalam target gradasi. Target gradasi ditentukan sesuai spesifikasi untuk ukuran agregat maksimum 19 mm (Lihat Tabel 3.3 dan Gambar 3.3)

Jenis campuran yang akan digunakan untuk pembuatan benda uji adalah campuran panas agregat dan aspal dari hasil daur ulang bongkaran aspal Jalan Gajahmada dari Base Camp AMP PT Bumi Redjo Prupuk ditambah aspal peremaja ditetapkan 3 % aspal hasil *recycling* bervariasi mulai dari 1.5 % sampai 4 % untuk Laston AC

Dari Tabel 3.4. dapat diketahui proporsi masing-masing fraksi. Setiap benda uji umumnya memerlukan berat kira-kira 1200 gram untuk menghasilkan tinggi benda uji setelah dipadatkan setinggi $63,50 \pm 1,27$ mm dengan diameter 100 mm (4 inchi).

Tabel 3.4 Target Gradasi Campuran Lapis Aspal Beton (laston) No.X

Ukuran Ayakan		Spesifikasi No X % Berat yang Lolos	Berat tertahan (gr)	
ASTM	mm		Persen tertahan	Berat (gr)
1"	25,4	100	0	0
¾"	19,1	97	3	36
3/8 "	9,52	67	30	360
No. 4	4,76	49	18	216
No. 8	2,38	37	12	144
No.30	0,59	20	17	204
No.50	0,279	14	6	72
No. 200	0,074	6	8	96
PAN	-	-	6	72
		Total	100	1200

Untuk menentukan kadar aspal optimum diperkirakan dengan penentuan kadar aspal optimum secara empiris dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_b = 0,035 (\%CA) + 0,045 (\%FA) + 0,18 (\%FF) + K \dots\dots\dots(3.1)$$

dengan :

- Pb = Perkiraan Kadar Aspal terhadap campuran, persentase berat terhadap campuran
- CA = Agregat kasar tertahan saringan No.8 (2,36)
- FA = Agregat halus lolos saringan No.8 (2,36)
- FF = Bahan Pengisi (*Filler*) lolos saringan No. 200
- K = Konstanta 0,5-1,0 untuk Laston

Bulatkan prakiraan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) sampai dengan 0.50% terdekat, jika hasil perhitungan diperoleh misalnya di dapat 5.7 %, maka dibulatkan menjadi 6 %, kemudian siapkan benda uji untuk *Marshall test* sesuai tahapan berikut ini :

a. Tahap I :

Berdasarkan perkiraan kadar aspal optimum (KAO) dibuat benda uji dengan jenis aspal pertamina dengan empat variasi kadar aspal dari aspal optimum yang ada pada bongkaran aspal dengan *Cold Milling* di Jalan Gajahmada Tegal yaitu -1.0 %, -0.5 %, + 1,

KAO, +0.5%, +1.0 %. Masing-masing terdiri dari 4 (empat) benda uji, 2 (dua) kering (*Dry/ D*) dan 2 (dua) rendaman (*Soaked/ S*). Kemudian dilakukan pengujian *Marshall* Standar dengan tumbukan 2 x 75 untuk menentukan *VIM*, *VMA*, *VFA*, Kepadatan, Stabilitas, Kelelahan (*Flow*), hasil bagi *Marshall*, Indeks Kekuatan Rendaman *Marshall* (*IRS*) Dari grafik hubungan antara kadar Aspal dengan parameter Marshall, tentukan kadar Aspal Optimum (KAO).

b. Tahap II :

Berdasarkan hasil pengujian Tahap I untuk mendapatkan kadar aspal optimum, dibuat benda uji dengan menetapkan kadar aspal *recycling* sebesar 3 % dengan menambahkan kadar aspal baru mulai dari 1.5% sampai 4 %, serta merencanakan total kadar aspal pada variasi (-1.50% + -1.0% + -0.50%; KAO + 0.50% + 1.0%) dengan memakai agregat hasil bongkaran/lama dan juga memakai bahan agregat baru, kemudian lakukan kembali uji *Marshall* standar (2 x 75) tumbukan, serta uji Durabilitas untuk menentukan *VIM*, *VMA*, *VFA*, kepadatan, stabilitas, kelelahan , hasil bagi Marshall dan Indeks kekuatan rendaman *Marshall* setelah perendaman.

a. Perencanaan Jumlah Benda Uji

- 1). Pada Tahap I dibuat 5 (lima) seri benda uji dimana setiap seri terdiri dari 4 (empat) buah yang terdiri dari aspal baru dan agregat baru untuk mendapatkan kadar aspal optimum. Perbedaan kadar aspalnya dilakukan dengan menambah dan mengurangi tiap 0.5 % (terhadap kadar aspal optimumnya) masing-masing benda uji. Tabel 3.5 berikut adalah rinciannya:

Tabel 3.5 Jumlah Sampel Benda Uji yang Direncanakan untuk *Marshall* Standar

Variasi Aspal	Kadar Aspal Terhadap Aspal Optimum					Jumlah Benda Uji (Buah)
	-1,0%	-0,5%	KAO	+0,5%	+1,0%	
Penambahan (+) dan Pengurangan (-)	2D	2D	2D	2D	2D	10
	2S	2S	2S	2S	2S	10
Jumlah Benda Uji / Uji <i>Marshall</i>						20

- 2) Pada Tahap II dibuat 6 (enam) seri benda uji dimana setiap seri terdiri dari 4 (empat) buah yang terdiri dari aspal hasil *recycling* tetap sebesar 3% dan aspal baru divariasikan mulai dari 1.5%, 2%, 2.5%, 3%, 3.5%, 4% dan agregat hasil bongkaran/lama. Perbedaan kadar aspalnya dilakukan dengan menambah dan mengurangi tiap 0.5 % (terhadap kadar aspal optimumnya) masing-masing benda uji. Tabel 3.6 berikut adalah rinciannya:

Tabel 3.6 Variasi Kadar Aspal Benda Uji Agregat Lama (Bongkaran Aspal) untuk Pengujian *Marshall* dan ISS

Variasi Aspal	Kadar Aspal Terhadap Aspal Optimum						Jumlah Benda Uji (Buah)
Kadar aspal <i>recycling</i> tetap 3%.	-1,0%	-0,5%	AOpt	+0,5%	+1,0%	+1,5%	
Aspal baru divariasikan 1.5%,2%,2.5%,3%,3.5%,4%.	2D	2D	2D	2D	2D	2D	12
	2S	2S	2S	2S	2S	2S	12
Jumlah Benda Uji / Uji <i>Marshall</i> Standar Kadar Aspal Optimum							24

- 3) Pada Tahap II juga dibuat 6 (enam) seri benda uji dimana setiap seri terdiri dari 4 (empat) buah yang terdiri dari aspal hasil *recycling* tetap sebesar 3% dan aspal baru divariasikan mulai dari 1.5%, 2%, 2.5%, 3%, 3.5%, 4% dan agregat baru. Perbedaan kadar aspalnya dilakukan dengan menambah dan mengurangi tiap 0.5 % (terhadap kadar aspal optimumnya) masing-masing benda uji. Tabel 3.7 berikut adalah rinciannya:

Tabel 3.7 Variasi Kadar Aspal Benda Uji Agregat Baru untuk Pengujian *Marshall* dan ISS.

Variasi Aspal	Kadar Aspal Terhadap Aspal Optimum						Jumlah Benda Uji (Buah)
Kadar aspal <i>recycling</i> tetap 3%.	-1,0%	-0,5%	AOpt	+0,5%	+1,0%	+1,5%	
Aspal baru divariasikan 1.5%,2%,2.5%,3%,3.5%,4%.	2D	2D	2D	2D	2D	2D	12
	2S	2S	2S	2S	2S	2S	12
Jumlah Benda Uji / Uji <i>Marshall</i> Standar Kadar Aspal Optimum							24

Keterangan:

S= Sampel diasumsikan dalam kondisi rendaman (*Soaked*)

D= Sampel diasumsikan dalam kondisi kering (*Dry*)

Jumlah total sampel benda uji penelitian adalah : 20+ 24 + 24 = 68 buah.

3.6.3. Uji Laboratorium

a. Proses Pengujian

Kegiatan uji laboratorium pada penelitian ini meliputi:

1). Pengujian Campuran dengan Ekstraksi

Pengujian terhadap campuran dilakukan dengan alat ekstraksi pada bahan material bongkaran aspal beton Jalan Gajahmada Tegal :

- a) Campuran bongkaran laston tipe X di oven $\pm \frac{1}{2}$ jam dengan suhu $110^{\circ} \text{C} \pm 5^{\circ} \text{C}$, selanjutnya diambil secukupnya dimasukkan ke dalam *bowl* yang sudah ditimbang (ditentukan beratnya) kemudian ditimbang,
- b) *Bowl* + benda uji dimasukkan ke ekstraktor, kemudian tuangkan CCl_4 penuh, selanjutnya ditutup dan dilapisi kertas *filter* yang sudah ditimbang,
- c) Diamkan ± 10 menit, kemudian diputar selama ± 1 menit,
- d) Tuangkan CCl_4 lagi penuh dan didiamkan lagi ± 5 menit, baru diputar lagi selama ± 1 menit.
- e) Pekerjaan nomer (d), diulang-ulang sampai CCl_4 yang keluar jernih betul.
- f) Keluarkan *bowl* dan benda uji, lalu di oven, dikeluarkan setelah dingin ditimbang, begitu pula halnya dengan kertas *filter*nya, juga sisa dari larutan ekstraksinya juga ditimbang.
- g) Dari hasil ekstraksi bisa diketahui juga analisa saringan, dengan menyaring kemabali sisa ekstraksi tersebut, dimana sisa alrutan dianggap/dimasukkan pada saringan lolos No.200.

2). Pengujian Campuran dengan *Marshall test*

Pengujian yang dilakukan menggunakan metode *Marshall* seperti cara-cara di bawah ini:

- a) Menimbang agregat hasil bongkaran dan material agregat baru dari PT Bumi Redjo Prupuk sesuai dengan prosentase pada target gradasi yang diinginkan untuk masing-masing fraksi dengan berat campuran kira-kira 1200 gram untuk

- diameter 4 inchi, kemudian keringkan campuran agregat tersebut sampai beratnya tetap pada suhu $(105 \pm 5) ^\circ \text{C}$,
- b) Memanaskan aspal untuk pencampuran yaitu pada viskositas kinematik 170 ± 20 centistokes, agar temperatur pencampuran agregat dan aspal tetap maka pencampuran dilakukan di atas pemanas dan diaduk hingga rata.
 - c) Setelah temperatur pemadatan tercapai yaitu pada viskositas kinematik 280 ± 30 centistokes, maka campuran tersebut dimasukkan ke dalam cetakan yang telah dipanasi (95°C hingga 150°C) diolesi vaselin terlebih dahulu, serta bagian bawah cetakan diberi sepotong kertas filter atau kertas lilin (*waxed paper*) yang telah dipotong sesuai dengan diameter cetakan, sambil ditusuk-tusuk dengan spatula sebanyak 15 kali di bagian tepi dan 10 kali di bagian tengah,
 - d) Pemadatan standar dilakukan dengan pemadat manual atau elektrik dengan jumlah tumbukan 75 kali di bagian atas kemudian dibalik dan sisi bagian bawah juga ditumbuk sebanyak 75 kali pada temperatur $\pm 140^\circ \text{C}$,
 - e) Setelah proses pemadatan selesai, benda uji didiamkan agar suhunya turun, setelah dingin benda uji dikeluarkan dengan ejektor dan diberi kode,
 - f) Benda uji dibersihkan dari kotoran yang menempel dan diukur tinggi benda uji dengan ketelitian 0,1 mm dan ditimbang berat di udara,
 - g) Benda uji direndam dalam air selama 10-24 jam supaya jenuh,
 - h) Setelah jenuh benda uji ditimbang dalam air,
 - i) Benda uji dikeluarkan dari bak perendam dan dikeringkan dengan kain pada permukaan agar kondisi kering permukaan jenuh (*Saturated Surface Dry, SSD*) kemudian ditimbang,
 - j) Benda uji direndam dalam bak perendaman pada suhu $60^\circ \text{C} \pm 1^\circ \text{C}$ selama 30 hingga 40 menit. Untuk uji perendaman pada suhu $60^\circ \text{C} \pm 1^\circ \text{C}$ selama 24 jam,
 - k) Bagian dalam permukaan kepala penekan dibersihkan dan dilumasi agar benda uji mudah dilepaskan setelah pengujian,
 - l) Benda uji dikeluarkan dari bak perendam, letakkan benda uji tepat di tengah pada bagian bawah kepala penekan kemudian letakkan bagian atas kepala penekan dengan memasukkan lewat batang penuntun, kemudian letakkan pemasangan yang sudah lengkap tersebut tepat di tengah salah satu batang penuntun,

- m) Kepala penekan dinaikkan hingga menyentuh alas cincin penguji, kemudian diatur kedudukan jarum arloji penekan dan arloji kelelahan pada angka nol,
- n) Pembebanan dilakukan dengan kecepatan tetap 51 mm (2 inchi) per menit, hingga kegagalan benda uji terjadi yaitu pada saat arloji pembebanan berhenti dan mulai kembali berputar menurun, pada saat itu pula dibuka arloji kelelahan,
- o) Titik pembacaan pada saat benda uji mengalami kegagalan adalah merupakan nilai stabilitas *Marshall*,
- p) Setelah pengujian selesai, kepala penekan diambil, bagian atas dibuka dan benda uji dikeluarkan. Waktu yang diperlukan dari saat diangkatnya benda uji dari rendaman air sampai tercapainya beban maksimum tidak boleh melebihi 30 detik,
- q) Untuk pembuatan benda uji dilakukan dengan menggunakan jenis aspal pertamina dengan tingkat penetrasi 60/70,
- r) Campuran agregat aspal antara aspal *recycling* dengan agregat hasil bongkaran/lama maupun dengan agregat baru, dimasukkan ke dalam cetakan dan ditumbuk tiap sisi sebanyak 75 kali pada temperatur $\pm 140^{\circ}\text{C}$,
- s) Setelah proses pemadatan selesai, benda uji didinginkan selama ± 4 jam, dan kemudian dilakukan test *Marshall*.

3).Pengujian Indeks Sisa Stabilitas *Marshall* (ISS)

Daya ikat berkelanjutan dari aspal terhadap agregat kasar dalam campuran bersifat sangat penting bagi kemampuan layanan dari perkerasan lentur. Ini karena salah satu kegagalan perkerasan lentur biasanya terkait dengan masalah kehilangan daya ikat ataupun pengelupasan film aspal dalam campuran. Pada sebagian besar agregat, daya ikat terhadap air jauh lebih besar jika dibandingkan terhadap aspal, karena air memiliki *wetting power* yang jauh lebih besar dari aspal (Soeprapto, 1995). Keberadaan debu yang berlebihan pada agregat juga akan berakibat kegagalan pengikatan ataupun berakibat munculnya potensi kehilangan daya ikat campuran.

Uji perendaman *Marshall* (*Marshall Immersion Test*) merupakan uji lanjutan dari uji *Marshall* sebelumnya, dengan maksud mengukur ketahanan daya ikat/adhesi campuran terhadap pengaruh air dan suhu (*water sensitivity and temperature susceptibility*). Ada beberapa cara yang digunakan untuk menilai tingkat durabilitas campuran, salah satunya

adalah dengan mencari Indeks Stabilitas Sisa rendaman *Marshall (ISS)*, nilai ISS diperoleh dengan cara membandingkan stabilitas setelah perendaman selama 24 jam pada suhu $60^0 \pm 1^0\text{C}$ dengan stabilitas selama setengah jam pada suhu yang sama. Cara menghitungnya menggunakan persamaan 3.14, semakin besar nilai *ISS* maka semakin besar tingkat durabilitas campuran tersebut. Bina Marga mensyaratkan lebih besar dari 75% untuk menjamin campuran tidak mengalami kehilangan daya ikat. Prosedur pengujian durabilitas mengikuti rujukan SNI M-58-1990. Perendaman benda uji dilakukan pada pada temperatur $60^0 \pm 1^0\text{C}$ selama 24 jam. Masing-masing golongan terdiri dari 2 sampel yang direndam pada bak perendam untuk semua variasi kadar aspal dan variasi suhu pemadatan.

3. 7. Analisa Hitungan

3.7.1. Berat Jenis *Bulk* dan *Apparent* dari Total Agregat

Total agregat terdiri dari fraksi agregat kasar, agregat halus dan *filler*, yang masing-masing mempunyai berat jenis yang berbeda, sehingga berat jenis kering (*bulk specific gravity*) dan *berat jenis semu (apparent specific gravity)* dari total agregat dapat dihitung berdasarkan persamaan 3.2 dan 3.3 dibawah ini :

- a. Berat jenis kering (*bulk specific gravity*) dari total agregat:

$$G_{sb_{tot \text{ agregat}}} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + + P_n}{\frac{P_1}{G_{sb_1}} + \frac{P_2}{G_{sb_2}} + \frac{P_3}{G_{sb_3}} + + \frac{P_n}{G_{sb_n}}} \dots\dots\dots(3.2)$$

- b. Berat jenis semu (*apparent specific gravity*) dari total agregat

$$G_{sa_{tot \text{ agregat}}} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + + P_n}{\frac{P_1}{G_{sa_1}} + \frac{P_2}{G_{sa_2}} + \frac{P_3}{G_{sa_3}} + + \frac{P_n}{G_{sa_n}}} \dots\dots\dots(3.3)$$

3.7.2. Berat jenis Efektif dari Total Agregat.

Berat jenis efektif dari total agregat dapat dicari berdasarkan hasil pengujian Kepadatan Maksimum Teoritis dengan menggunakan persamaan 3.4 dan 3.5, dibawah ini :

Berat jenis efektif dari total agregat

$$a. G_{se_{tot \text{ agregat}}} = \frac{G_{sb} + G_{sa}}{2} \dots\dots\dots(3.4)$$

$$b. G_{se_{tot \text{ agregat}}} = \frac{100 - Pb}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{Pb}{Gb}} \dots\dots\dots(3.5)$$

3.7.3. Volume Campuran dan berat Jenis Campuran setelah Pemadatan

a. Volume campuran setelah pemadatan

$$V_{bulk} = V_{SSD} - W_w \dots\dots\dots(3.6)$$

b. Berat jenis campuran setelah pemadatan

$$G_{mb} = \frac{W_a}{V_{bulk}} \dots\dots\dots(3.7)$$

c. Berat jenis campuran maksimum teoritis setelah pemadatan (G_{mm})

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{100 - Pb}{G_{se_{tot \text{ agregat}}} } + \frac{Pb}{G_{sb_{tot \text{ agregat}}} }} \dots\dots\dots(3.8)$$

3.7.4. Penyerapan Aspal

Penyerapan aspal dinyatakan dalam persen terhadap berat total agregat, dan bukan terhadap terhadap campuran. Persamaan penyerapan aspal (P_{ba}) seperti pada persamaan 3.9, dibawah ini

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} \times G_b \dots\dots\dots(3.9)$$

3.7.5. Kadar Aspal Efektif

Kadar aspal efektif (P_{be}) campuran beraspal adalah total kadar aspal dikurangi jumlah kadar aspal yang terserap oleh partikel agregat. Kadar aspal efektif akan menyelimuti permukaan agregat bagian luar ,yang akan menentukan kinerja perkerasan, dimana Persamaan kadar aspal efektif (P_{be}) seperti pada persamaan 3.10, dibawah ini

$$Pbe = Pb \times \frac{Pba}{100} \times Ps \quad \dots\dots\dots(3.10)$$

3.7.6. Rongga Udara (*Air Voids*)

a. Rongga udara dalam campuran (*Va*) atau *VIM*

Rongga udara dalam campuran (*Va*) atau *VIM* dalam campuran beraspal terdiri atas ruang udara diantara partikel agregat yang terselimuti aspal. Volume udara dalam campuran beraspal dapat ditentukan dengan persamaan Rongga udara dalam campuran (*Void In The Mixture/ VIM*) seperti pada persamaan (3.11)

$$VIM = 100 - 100 \times \frac{Gmb}{Gmm} \quad \dots\dots\dots(3.11)$$

b. Rongga udara antar mineral agregat (*Void in the Mineral Agregat/ VMA*)

Rongga udara antar mineral agregat (*VMA*) merupakan ruang rongga diantara partikel agrgat pada campuran beraspal, termasuk rongga udara dan volume aspal efektif (tidak termasuk volume aspal yang terserap agregat). *VMA* direncanakan berdasarkan berat jenis *bulk* (*Gsb*) agregat dan dinyatakan sebagai persen volume *bulk* campuran beraspal. Persamaan *VMA* terhadap campuran beraspal, seperti persamaan (3.12), dibawah ini :

$$VMA = 100 - \left[(100 - Pb) \times \frac{Gmb}{Gsb} \right] \quad \dots\dots\dots(3.12)$$

c. Rongga udara yang terisi aspal (*Voids Filled with Asphalt/ VFA*)

Rongga udara yang terisi aspal (*VFA*) adalah persen rongga yang terdapat diantara partikel agregat yang terisi oleh aspal, tidak termasuk aspal yang terserap oleh agregat. Persamaan *VFA* terhadap campuran beraspal, seperti persamaan (3.13), dibawah ini :

$$VFA = 100 \times \frac{(VMA - VIM)}{VMA} \quad \dots\dots\dots(3.13)$$

3.7.7. Stabilitas dan Flow

Nilai stabilitas diperoleh berdasarkan nilai yang ditunjukkan oleh jarum di dial stabilitas pada alat *test Marshall*, kemudian dikonversikan pada tabel kalibrasi sesuai *proving ring* yang digunakan dalam penelitian ini digunakan *proving ring* dengan kekuatan 10.000 lbf (5.000 kgf). Selanjutnya nilai stabilitas tersebut harus disesuaikan dengan angka koreksi akibat dari tebal benda uji. Untuk nilai *Flow* ditunjukkan pada angka pada jarum

dial *flow*, satuan pada dialnya sudah sesuai dalam satuam mm (milimeter), sehingga tidak diperlukan lagi konversi angka dan kalibrasi jarum dial *flow*.

3.7.8. *Marshall Quotient* dan Indeks Stabilitas Sisa (ISS)

a. *Marshall Quotient (MQ)*, merupakan hasil bagi dari stabilitas dibagi *flow*, yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.14), seperti dibawah ini:

$$MQ = \frac{MS}{MF} \dots\dots\dots(3.14)$$

Selanjutnya dilakukan uji rendaman *Marshall* selama 24 jam dalam suhu 60°C untuk mendapatkan nilai indeks stabilitas sisa

b. Indeks Stabilitas Sisa Marshall (ISS):

$$ISS = \left(\frac{MSI}{MSS} \right) \times 100\% \dots\dots\dots(3.15)$$

3.7.9. Pemeriksaan aspal ekstrasi (*Asphalt Extraction test*)

$$\frac{W_1 - (W_2 + f + S)}{W_1} \times 100\%$$

Keterangan :

G_{sb}	= Berat Jenis Bulk total agregat dalam gr/cc
$P_1, P_2, P_3, \dots P_n$	= Persen berat dari agregat 1,2,3...n
$G_{sb1}, G_{sb2}, G_{sb3}, \dots G_{sbn}$	= Berat Jenis Bulk dari agregat 1,2,3...n
G_{sa}	= Berat Jenis Aparent total agregat
$G_{sa1}, G_{sa2}, G_{sa3}, \dots G_{san}$	= Berat Jenis Aparent dari agregat 1,2,3...n
G_{mm}	= Berat Jenis Teoritis Maksimum dari Campuran padat tanpa rongga udara
P_{mm}	= Total Campuran yang hilang
P_b	= Kadar Aspal dari Total Berat Campuran
G_b	= Berat Jenis Aspal
P_s	= Persentase Agregat, persen dari total berat campuran
G_{mb}	= Berat Jenis Bulk dari campuran
VIM	= <i>Void In the Mix</i> (persen rongga dalam campuran),

	Persen dari total volume.
VMA	= <i>Void In Mineral Agregat</i> (persen rongga dalam mineral agregat), persen dari volume bulk.
VFB	= <i>Void Filled with Bitumen</i> (Persen Rongga Terisi Aspal), Persen dari VMA
MS	= <i>Stabilitas Marshall</i>
MF	= <i>Marshall Flow</i> (Kelelehan)
MSS	= <i>Stabilitas Marshall</i> kondisi standar.
MSI	= <i>Stabilitas Marshall</i> kondisi setengah direndam selama 24 jam dengan suhu 60°C.
ISS	= Indeks Stabilitas Sisa
W ₁	= Berat benda uji sebelum di ekstraksi
W ₂	= Berat benda uji setelah di ekstraksi
f	= Berat filter sebelum ekstraksi – berat filter sesudah di ekstraksi
S	= Berat sisa larutan.

3.8. Komparasi Data Sekunder

Data-data hasil uji laboratorium diolah dan diinventarisasi kemudian dianalisa dan dibandingkan dengan Data Sekunder yaitu spesifikasi lapis keras untuk kondisi eksisting bahan bongkaran di lokasi penelitian tahun 1999/2000, Jalan Gajahmada Tegal. Hasil dari penelitian ini adalah berupa rekomendasi teknis kelayakan aspal hasil daur ulang di lokasi penelitian untuk kondisi darurat kelangkaan suplai material pelapisan ulang (*overlay*).

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4. 1. Umum

Materi data dari penelitian ini diambil dari dua sumber data yaitu data primer dan data sekunder. Data Primer adalah data yang diambil dari hasil penelitian Laboratorium sesuai dengan jenis pengujian yang akan dilaksanakan baik terhadap pengujian bahan agregat maupun aspal. Sedangkan Data Sekunder adalah data yang diambil dari spesifikasi pekerjaan lapis perkerasan aspal pada kondisi eksisting jalan Gajahmada-Tegal pada tahun 1999/2000, yang termasuk dalam rangkuman spesifikasi teknik dan Job Mix Formula bahan agregat dan aspal pekerjaan Paket Pemeliharaan Berkala Jalan Pecagan-Losari Cs.

4.1.1. Kondisi Perkerasan yang Didaur Ulang

Evaluasi dilakukan dengan mengamati secara visual maupun pemeriksaan dengan alat. Dari hasil pemeriksaan dan leger jalan diperoleh hasil sebagai berikut:

a. *Wearing Course* lama terdiri dari:

Overlay	AC+ ATBL	Tahun 1999
Overlay	AC+ ATBL	Tahun 1993
Overlay	Penetrasi	Tahun 1980
Density	Lapis Aspal Buton (Lasbutag)	Tahun 1970

Sumber: Leger Jalan Gajahmada Tegal, 1999

b. Kerusakan lapisan permukaan berupa *bleeding* di beberapa tempat,

c. Kedalaman alur (*rutting*) umumnya lebih kecil dari 3 mm.

Secara umum ruas Jalan Gajahmada Tegal tidak menunjukkan adanya kerusakan struktural.

4.1.2. Spesifikasi Perkerasan Lama (Tahun 1999/2000)

Spesifikasi perkerasan lama diperoleh dari data leger jalan Bagian Proyek Rehabilitasi/ Pemeliharaan Jalan dan Jembatan Pekalongan Barat Dinas Bina Marga Propinsi Jawa

Tengah, pada Pekerjaan Paket Pemeliharaan Berkala Jalan Pejagan-Losari,Cs. Khusus untuk Job Mix AC Tahun 2000 yang dilaksanakan oleh Konsultan PT WIRAGUNA TANI & Ass. dan Kontraktor PT. BUMI REJO.

a. Aspal

Aspal pada spesifikasi semula (1999/2000) menggunakan aspal jenis AC 60/70 dari Pertamina Cilacap. Tabel 4.1 berikut menjelaskan karakteristik Aspal tahun 1999/2000.

Tabel 4.1 Karakteristik AC 60/70 Bahan Beton Aspal 1999/2000

No	Jenis Pemeriksaan	Spesifikasi Standar	Hasil Uji Karakteristik	Satuan
1	Penetrasi 25°C	60-79	73,5	0,1 mm
2	Titik Lembek	48-58	50,5	°C
3	Titik Nyala	Min 200	235	°C
4	Daktilitas 25 °C	Min 100	>150	cm
5	Kelarutan dalam CCl ₄	99	99,29	% berat
6	Berat Jenis	Min. 1	1,039	gr/cc

Sumber:

Job Mix AC Formula , Dinas Bina Marga Propinsi Jawa Tengah (1999-2000)

b. Agregat

Agregat pada spesifikasi semula (1999/2000) menggunakan agregat dari Sungai Glagah yang ditunjukkan Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Karakteristik Agregat Spesifikasi 1999/2000

No	Jenis Pemeriksaan	Spesifikasi Standar	Hasil Uji Karakteristik	Satuan
1	Abrasi	Max. 40	24,16	%
2	Kelekatan terhadap Aspal	95+	>95	%
3	BJ Semu Agregat Kasar	2,5	2,753	gr/cc
	BJ Semu Agregat Halus	2,5	2,746	gr/cc
	Rata-rata	2,5	2,749	gr/cc
4	Absorpsi Agregat Kasar	3	1.411	%
	Absorpsi Agregat Halus	3	2,177	%
	Rata-rata	3	1,794	%
5	Sand Equivalent	Min.50	64,80	%

Sumber:

Job Mix AC Formula , Dinas Bina Marga Propinsi Jawa Tengah (1999-2000)

c. **Mix Design Aspal Beton (Spesifikasi Lama 1999/2000)**

Job Mix AC tahun 1999/2000 menggunakan agregat dengan gradasi campuran ditunjukkan Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Gradasi Campuran Agregat Spesifikasi Tahun 1999/2000

No. Saringan	Hasil Tes	Spesifikasi
1"	-	-
¾"	100	100
½"	86.57	75-100
3/8"	77.58	60-85
NO.4	48.18	38-55
NO.8	33	27-40
NO.16	24.34	-
NO.30	17.06	14-24
NO.50	12.28	9 - 18
NO.100	8.27	5 - 12
NO.200	3.82	2 - 8

Sumber:

Job Mix AC Formula , Dinas Bina Marga Propinsi Jawa Tengah (1999-2000)

Kadar aspal, dan spesifikasi lainnya seperti ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Komposisi Campuran Aspal Spesifikasi 1999/2000

No	Komponen Campuran Aspal	Spesifikasi	Hasil Tes	Satuan
1	Stabilitas	Min 750	1102	kg
2	<i>Marshall Quotient (MQ)</i>	2 00– 500	34.85	kg/mm
3	Kadar Rongga Udara	3 - 5	4.1	%
4	Kadar Aspal Efektif	4.3 – 7	6.8	%
5	Absorpsi Aspal	Max 1.7	0.939	%
6	Total Kadar Aspal	-	6	%
7	<i>Flow</i>	-	3.48	mm
8	Tebal Lapisan Aspal	-	6.264	cm
9	Berat Isi (BJ Bulk)/ <i>Density</i>	-	2.342	gr/cc

Sumber:

Job Mix AC Formula , Dinas Bina Marga Propinsi Jawa Tengah (1999-2000)

4.1.3. Data Hasil Penelitian Laboratorium dari Bahan Bongkaran

Bahan bongkaran dari ruas Jalan Gajahmada Tegal di Laboratorium dilaksanakan pemisahan antara dua komponen utamanya yaitu aspal dan agregat dengan proses ekstraksi. Dari hasil pemisahan yang dilaksanakan diperoleh data sebagai berikut:

a. Aspal

Hasil uji Laboratorium untuk aspal pada bahan bongkaran aspal di ruas Jalan Gajahmada Tegal dapat dilihat dari Tabel 4.5 berikut.

Tabel 4.5 Karakteristik Aspal 60/70 Hasil Bongkaran Beton Aspal 1999/2000

No	Jenis Pemeriksaan	Spesifikasi Standar	Hasil Uji Karakteristik	Satuan
1	Penetrasi 25°C	60-79	57.20	0,1 mm
2	Titik Lembek	48-58	51	°C
3	Titik Nyala	Min 200	215	°C
4	Daktilitas 25 °C	Min 100	>100	cm
5	Kelarutan dalam CCl_4	Min 99	99.05	% berat
6	Berat Jenis	Min. 1	1.032	gr/cc

Sumber: Hasil Pemeriksaan Laboratorium, di Laboratorium Akademi Teknologi Semarang , Agustus 2003.

Sifat-sifat fisik dan Spesifikasi hasil uji laboratorium aspal hasil bongkaran aspal ruas Jalan Gajahmada Tegal dapat dilihat pada Lampiran B.18.

b. Agregat

Hasil uji Laboratorium untuk Agregat pada bahan bongkaran aspal di ruas Jalan Gajahmada Tegal dapat dilihat dari Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Karakteristik Agregat Hasil Bongkaran Beton Aspal 1999/2000

No	Jenis Pemeriksaan	Spesifikasi Standar	Hasil Uji Karakteristik Pra Daur Ulang	Hasil Uji Karakteristik Pasca Daur Ulang	Satuan
1	Abrasi	Max. 40	24.16	35.80	%
2	Kelekatan terhadap Aspal	95+	> 95	> 95	%
3	BJ Semu Agregat Kasar	2,5	2.538	2.618	gr/cc
	BJ Semu Agregat Halus	2,5	2.667	2.806	gr/cc
	Rata-rata	2,5	2.603	2.712	gr/cc
4	Absorpsi Agregat Kasar	3	0.331	1.400	%
	Absorpsi Agregat Halus	3	2.459	1.833	%
	Rata-rata	3	1.395	1.617	%
5	Sand Equivalent	Min.50	90.4	91.84	%
6	Soundness	Max.7	1.87	5.06	%

c. Campuran

Berdasarkan hasil pemisahan material yang dilakukan terhadap bahan bongkaran diperoleh analisis gradasi material agregat seperti ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Gradasi Campuran Agregat Hasil Bongkaran Beton Aspal 1999/2000

No. Saringan	Hasil Tes (%)	Spesifikasi (%)
1"	-	-
3/4"	-	100
1/2"	6,9	75-100
3/8"	10,3	60-85
NO.4	27,7	38-55
NO.8	9	27-40
NO.16	-	-
NO.30	15,7	14-24
NO.50	-	9 - 18
NO.100	-	5 - 12
NO.200	-	2 - 8

Sumber:

Hasil Uji Laboratorium, di Laboratorium Akademi Teknologi Semarang, Agustus 2003

Sedangkan hasil uji ekstraksi laboratorium diperoleh kadar aspal rata-rata sebesar 5,10 %. Hasil dari uji ekstraksi disajikan pada Tabel 4.8

Tabel 4.8 Hasil Pengujian Ekstraksi Kadar Aspal Bongkaran Spesifikasi 1999/2000

No. Benda Uji	Kadar Aspal Hasil Ekstraksi (%)
1	5,03
2	5,33
3	4,55
4	5,28
5	4,93
6	4,46
Rata-rata	5,10

Sumber : Hasil Uji Laboratorium, di Laboratorium Akademi Teknik Semarang, Agustus 2003

4.1.4. Perencanaan Campuran (*Mix Design*) dari Bahan Bongkaran

a. Agregat

Perencanaan Campuran daur ulang direncanakan menggunakan agregat dari bahan bongkaran dan sebagai perbandingan digunakan agregat baru, dengan bahan pengikat aspal yang berasal dari bahan bongkaran aspal ruas Jalan Gajahmada Tegal ditambah aspal peremaja.

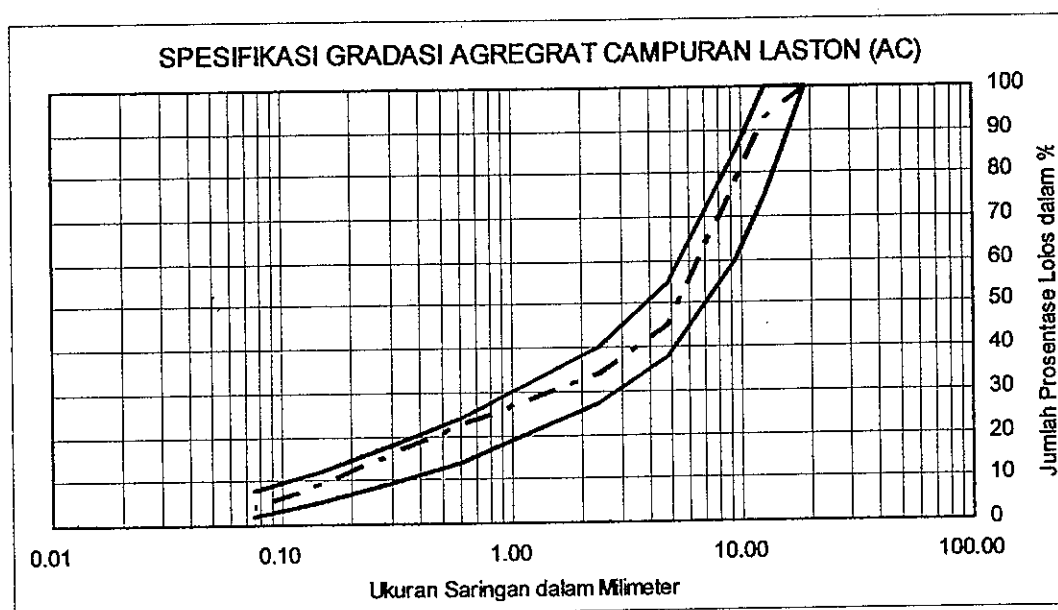
Analisis Saringan agregat bahan campuran daur ulang kasar dan halus, serta pemeriksaan agregat lainnya dan grafik pembagian butiran agregat campuran daur ulang dapat dilihat pada Tabel 4.9

Tabel 4.9 Analisa Saringan Agregat Kombinasi untuk Perencanaan Campuran

Komposisi	100%				Gradasi Kombinasi Spec. 99/00	Spesifikasi AC	
	10%	54%	26%	10%		BAWAH	ATAS
No Saringan	BP. Maks ¾"	BP. Maks ½ "	ABU BATU	PASIR			
1"	100	100	100	100	100	100	100
¾"	100	100	100	100	100	100	100
½"	31.44	100	100	100	86.57	75	100
3/8"	5.05	77.50	100	100	77.58	60	85
NO.4	0.43	20.83	93.44	97.86	48.18	38	55
NO.8	0.31	8.96	76.74	94.04	33	27	40
NO.16	0.30	5.07	61.84	91.32	24.34	-	-
NO.30	0.27	3.88	46.80	82.98	17.06	14	24
NO.50	0.25	3.07	32.72	57.68	12.28	9	18
NO.100	0.19	1.90	22.50	24.42	8.27	5	12
NO.200	0.12	0.96	10.74	7.24	3.82	2	8
CA= 65,77+ MA=30,18+ FF=4,05=100							

Sumber: Job Mix AC Formula, 1999, Proyek Rehabilitasi/ Pemeliharaan Jalan dan Jembatan Pekalongan Barat Propinsi Jawa Tengah, Bagian Pemeliharaan Berkala Jalan Pejagan-Losari

Berikut adalah Grafik Analisa Saringan dari Tabel 4.9 yang disajikan seperti Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik Analisa Saringan Gradasi Kombinasi Spesifikasi 1999/2000

b. Aspal

Aspal sebagai bahan pengikat menggunakan hasil pemisahan dan penyulingan dari bahan bongkaran dan penambahan aspal baru. Spesifikasi dari aspal yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.5 tentang sifat karakteristik dan jenis aspal hasil bongkaran.

Berdasarkan hasil pemeriksaan Laboratorium menunjukkan bahwa kadar aspal bongkaran sebesar 5,1 % (Lihat Lampiran B-25), sedangkan kadar aspal dari Job Mix AC ruas Jalan Gajahmada Tegal Tahun 1999/2000 adalah sebesar 6,8 % (Lihat Tabel 4.4)

c. Campuran Kerja Penelitian

Berdasarkan evaluasi material pembentuk lapisan utama lapis keras yaitu aspal dan agregat, maka campuran kerja dari penelitian dapat diformulasikan sebagai berikut:

- 1). Menggabungkan agregat hasil dari bahan bongkaran dengan aspal lama yang ditetapkan sebesar 3% ditambah aspal baru bervariasi mulai dari 1.5% sampai 4%, agar diperoleh suatu campuran yang diinginkan sesuai campuran beton aspal tipe X.
- 2). Menggabungkan agregat baru dari lokasi Prupuk-Tegal dengan aspal lama yang ditetapkan sebesar 3% ditambah aspal baru bervariasi mulai dari 1.5% sampai 4%, agar diperoleh suatu campuran yang diinginkan sesuai campuran beton aspal tipe X, sebagai perbandingannya.

4. 2. Hasil Pengujian Material di Laboratorium.

Sebagaimana yang telah disampaikan pada bagan alir pengujian material dilakukan dengan acuan Standar Nasional Indonesia (SNI) dan *AASHTO* sebagai acuan apabila pengujian yang dimaksud tidak terdapat dalam SNI, pengujian material meliputi : pemeriksaan sifat agregat (kasar, halus dan *Filler*), dan pemeriksaan sifat fisik aspal Penetrasi 60/70 (ex Pertamina).

4.2.1. Hasil Pemeriksaan Sifat Fisik Agregat

Hasil pemeriksaan fisik agregat hasil bongkaran dan agregat baru asal Prupuk-Tegal meliputi agregat kasar, agregat halus dan *filler* dipresentasikan pada Tabel 4.10 dan Tabel 4.11. Hasil pemeriksaan fisik secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran A.

Tabel 4.10. Hasil Pemeriksaan Sifat Fisik Agregat hasil bongkaran

No	Sifat-sifat	Sat.	Spesifikasi		Hasil Pemeriksaan	Keterangan
			Minimum	Maksimum		
Agregat Kasar						
1	Penyerapan air	%	-	3	0.331	Memenuhi
2	Berat jenis <i>bulk</i>	gr/cc	2,5	-	2.517	Memenuhi
3	Berat jenis semu	gr/cc	-	-	2.538	Memenuhi
4	Berat jenis efektif	gr/cc	-	-	2.525	Memenuhi
5	Tes abrasi Los Angeles	%	-	40	35.80	Memenuhi
6	Indeks kepipihan	%	-	10	3.376	Memenuhi
7	Kelekatan dengan aspal	%	95	-	98	Memenuhi
8	<i>Soundness test</i>	%	-	7	5.06	Memenuhi
Agregat Halus						
1	Penyerapan air	%	-	3	2.459	Memenuhi
2	Berat jenis <i>bulk</i>	gr/cc	2,5	-	2.503	Memenuhi
3	Berat jenis semu	gr/cc	-	-	2.667	Memenuhi
4	Berat jenis efektif	gr/cc	-	-	2.459	Memenuhi
5	<i>Sand equivalent</i>	%	50	-	64.48	Memenuhi
Filler						
1	Berat jenis	gr/cc	1	-	2.594	Memenuhi

Tabel 4.11. Hasil Pemeriksaan Sifat Fisik Agregat baru asal Prupuk-Tegal

No	Sifat-sifat	Sat.	Spesifikasi		Hasil Pemeriksaan	Keterangan
			Minimum	Maksimum		
Agregat Kasar						
1	Penyerapan air	%	-	3	1.40	Memenuhi
2	Berat jenis <i>bulk</i>	gr/cc	2,5	-	2.525	Memenuhi
3	Berat jenis semu	gr/cc	-	-	2.618	Memenuhi
4	Berat jenis efektif	gr/cc	-	-	2.561	Memenuhi
5	Tes abrasi Los Angeles	%	-	40	23.04	Memenuhi
6	Indeks kepipihan	%	-	10	1.71	Memenuhi
7	Kelekatan dengan aspal	%	95	-	98	Memenuhi
8	<i>Soundness test</i>	%	-	7	1.87	Memenuhi
Agregat Halus						
1	Penyerapan air	%	-	3	1.833	Memenuhi
2	Berat jenis <i>bulk</i>	gr/cc	2,5	-	2.668	Memenuhi
3	Berat jenis semu	gr/cc	-	-	2.806	Memenuhi
4	Berat jenis efektif	gr/cc	-	-	2.717	Memenuhi
5	<i>Sand equivalent</i>	%	50	-	90.7	Memenuhi
Filler						
1	Berat jenis	gr/cc	1	-	2.548	Memenuhi

Hasil-hasil pengujian agregat menunjukkan bahwa baik agregat kasar, agregat halus dan *filler* memenuhi persyaratan. Agregat kasar lama hasil bongkaran dan Agregat kasar

baru dari batu kali berasal dari ex Prupuk-Tegal, mempunyai nilai berat jenis *bulk* (curah) 2.517 gr/cc dan 2.525 gr/cc (Lihat Tabel 4.11 dan Lampiran A.6). Hasil tersebut lebih besar dari nilai berat jenis minimal sebesar 2.5 gr/cc, sedangkan berat jenis semu dan berat jenis efektif tidak dipersyaratkan, tetapi sebaiknya mengacu pada persyaratan > 2,5 gr/cc, sedangkan penyerapan air diperoleh dari uji didapat hasil 0.331% dan 1.40 % yang lebih kecil dari syarat yang ditetapkan maksimum sebesar 3%.

Untuk hasil uji keausan agregat kasar dengan menggunakan mesin *Los Angeles*, menunjukkan bahwa agregat kasar yang akan digunakan tahan terhadap abrasi, ini dapat dilihat dari hasil uji nilai keausan 35.80% dan 23.04% (Lihat Lampiran A.9) yang diperoleh lebih kecil dari persyaratan yang ditetapkan maksimum sebesar 40 %, sedangkan nilai kelekatan agregat kasar terhadap aspal 98 % (Lihat Lampiran A.9), menunjukkan bahwa hasil tersebut lebih dari 95 % sebagai syarat minimum yang ditetapkan untuk agregat kasar terselimuti aspal.

Pengujian Indek Kepipihan yang bertujuan untuk membatasi jumlah agregat kasar bentuk pipih dalam campuran ditunjukkan dalam nilai indek kepipihan. Dari hasil pengujian didapat nilai indek kepipihan 3.376% dan 1.71% dibawah batas maksimal yang dipersyaratkan sebesar 10 %.

Pengujian *Soundness* bertujuan untuk menentukan ketahanan agregat kasar terhadap pengaruh cuaca yang menunjukkan tingkat keawetan suatu gregat, dari hasil uji pada agregat yang lolos saringan $\frac{3}{4}$ " dan tertahan $\frac{3}{8}$ ", serta lolos saringan $\frac{3}{8}$ " tertahan #4, hasil rerata yang diperoleh 5, 06% dan 1.87% dibawah batas maksimal yang disyaratkan sebesar 7 %.

Pada pengujian agregat halus, hasil pengujian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa agregat halus (pasir) lama berasal dari hasil bongkaran dan agregat halus (pasir) baru berasal, dari Prupuk-Tegal mempunyai nilai berat jenis *bulk* (curah) 2.503 gr/cc dan 2.668 gr/cc lebih besar dari nilai berat jenis minimal sebesar 2.5 gr/cc, sedangkan berat jenis semu dan berat jenis efektif tidak disyaratkan, tetapi sebaiknya mengacu pada syarat > 2.5 gr/cc, sedangkan penyerapan air diperoleh hasil 2.459% dan 1.833% yang lebih kecil dari syarat yang ditetapkan sebesar 3%.

Uji *sand equivalent* bertujuan untuk mengetahui kandungan kadar lumpur pada agregat halus, syarat nilai *sand equivalen* minimum 50 %, sedangkan hasil uji yang diperoleh dari agregat halus 64.48% dan 90.7%, hasil tersebut memenuhi batas minimum yang disyaratkan.

Pada pengujian untuk *filler* sebagaimana disyaratkan hanya diuji berat jenis, sebagai rujukan syarat minimal 1%, sedangkan hasil uji yang diperoleh nilainya sebesar 2.594gr/cc dan 2.548 gr/cc

Secara keseluruhan baik agregat kasar, agregat halus dan *filler* telah memenuhi syarat sebagai bahan campuran beton aspal Laston tipe X.

4.2.2. Hasil Pemeriksaan Sifat Fisik Aspal

Pemeriksaan dilakukan terhadap sifat fisik aspal penetrasi 60/70 untuk ex Pertamina yang telah memenuhi spesifikasi SNI dan AASHTO. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.12 dan hasil secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran B.

Tabel 4.12. Hasil Pemeriksaan Sifat Fisik Aspal Pen. 60/70. Ex Pertamina

No	Sifat-sifat	Satuan	Spesifikasi Pen 60/70		Hasil Pemeriksaan	Keterangan
			Min	Max		
1	Penetrasi (25°C, 100 gr, 5 detik)	0.1 mm	60	79	62	Memenuhi
2	Titik lembek (<i>ring and ball test</i>)	°C	48	58	54	Memenuhi
3	Titik nyala (<i>cleveland open cup</i>)	°C	200	-	321	Memenuhi
4	Kehilangan berat (163°C), 5 jam	% berat	-	0.4	0.16	Memenuhi
5	Kelarutan (CCl ₄)	% berat	99	-	99.32	Memenuhi
6	Daktilitas (25°C, 5 cm per menit)	Cm	100	-	>110	Memenuhi
7	Pen setelah kehilangan berat	% asli	54	-	81.83	Memenuhi
8	Daktilitas setelah kehilangan berat	Cm	50	-	>110	Memenuhi
9	Berat jenis (25°C)	gr/cm ³	1	-	1.032	Memenuhi

Aspal merupakan hasil dari sisa (residu) dari produksi minyak mentah, sehingga sifat-sifat aspal harus selalu diperiksa dilaboratorium, pemeriksaan aspal terdiri dari :

a. Pemeriksaan Penetrasi

Nilai penetrasi didapat dari uji penetrasi dari alat penetrometer pada suhu 25°C dengan beban 100 gr selama 5 detik, dimana dilakukan sebanyak lima kali dan duplo. Dari hasil pemeriksaan penetrasi 60/70 di atas menunjukkan bahwa hasilnya memenuhi persyaratan spesifikasi antara 60 mm – 79 mm.

b. Pemeriksaan Daktilitas Aspal

Tujuan dari pemeriksaan ini adalah mengukur jarak terpanjang yang dapat ditarik pada cetakan yang berisi aspal sebelum putus, pada suhu 25°C dengan kecepatan tarik 5

cm/menit. Besarnya daktilitas aspal 60/70 syarat > 100 cm. Dari hasil uji pemeriksaan daktilitas diperoleh hasil diatas 110 cm, sehingga kedua jenis aspal penetrasi 60/70 diatas menunjukkan hasil memenuhi persyaratan.

c. Pemeriksaan Titik Lembek

Tujuan dari pemeriksaan ini adalah mengukur nilai temperatur dimana bola-bola baja mendesak turun lapisan aspal yang ada pada cincin, hingga aspal tersebut menyentuh dasar pelat yang terletak pada dibawah cincin pada jarak 1 (inch), sebagai akibat dari percepatan pemanasan tertentu. Berat bola baja 3,45 -3,55 gr dengan diameter 9,53 mm. Pemeriksaan ini diperlukan untuk mengetahui batas kekerasan aspal. Pengamatan titik lembek dimulai dari suhu 5°C sebagai batas paling tinggi sifat kekakuan dari aspal yang disebabkan sifat termoplastik. Untuk aspal keras jenis penetrasi 60/70, syarat titik lembek berkisar antara $48^{\circ}\text{C} - 58^{\circ}\text{C}$. Dari pengujian yang dilakukan diperoleh nilai 54°C dan ternyata memenuhi syarat.

d. Pemeriksaan Titik Nyala

Pemeriksaan ini untuk menentukan suhu dimana diperoleh nyala pertama diatas permukaan aspal dan menentukan suhu dimana terjadi terbakarnya pertama kali diatas permukaan aspal. Dengan mengetahui nilai titik nyala dan titik bakar aspal, maka dapat diketahui suhu maksimum dalam memanaskan aspal sebelum terbakar. Besarnya titik nyala yang disyaratkan untuk penetrasi 60/70 minimal 200°C . Dari hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa titik nyala dan titik bakar bernilai 321°C , di atas persyaratan yang ditentukan

e. Pemeriksaan kehilangan berat

Pemeriksaan ini berguna untuk mengetahui pengurangan berat akibat penguapan unsur-unsur aspal yang mudah menguap dalam aspal. Apabila aspal dipanaskan di dalam oven pada suhu 163°C dalam waktu 4,5 – 5 jam, maka akan terjadi reaksi terhadap unsur-unsur pada aspal, sehingga dimungkinkan sifat aspal akan berubah, ini tidak diharapkan pada lapis perkerasan lentur dengan menggunakan aspal, untuk itu dipersyaratkan penurunan berat aspal maksimum adalah 0,4 % dari berat semula. Dari hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa kehilangan berat aspal bernilai 0,16 sehingga memenuhi persyaratan yang ditentukan.

f. Pemeriksaan penetrasi setelah kehilangan berat.

Aspal yang dipanaskan pada suhu 163°C . Selama waktu $\pm 5\text{jam}$ akan mengalami kehilangan berat, sebagai akibatnya aspal akan mengalami perubahan sifat, perubahan ini akan diketahui dari pemeriksaan terhadap aspal tersebut. Pemeriksaan aspal dilakukan uji penetrasi setelah kehilangan berat yang pada umumnya aspal yang sudah mengalami penurunan berat akan mempunyai angka penetrasi yang lebih kecil dari angka penetrasi standarnya, dengan kata lain kekerasannya menjadi meningkat, tetapi bukan berarti kualitas aspal menjadi semakin baik, dikarenakan sifat aspal menjadi kurang lentur dan mudah retak, dalam hal ini justru akan mengurangi kualitas aspal. Dari hasil pemeriksaan diperoleh persentasi penetrasi setelah kehilangan berat sebesar 81,83 % dibandingkan dengan penetrasi standarnya (minimal 54%), dengan demikian memenuhi persyaratan.

g. Pemeriksaan kelarutan dalam Carbon tetra Clorida (CCl_4)

Pemeriksaan ini dilakukan untuk menentukan jumlah unsur aspal dalam CCl_4 , dengan adanya bahan-bahan tidak terlarut dalam CCl_4 menunjukkan adanya bahan lain yang terlarut dalam residu aspal. Persyaratan dalam pemakaian aspal yang diinginkan adalah aspal dalam kondisi tidak tercampur dengan bahan-bahan lain yang tidak terlarut dalam CCl_4 , untuk aspal penetrasi 60/70 disebutkan minimal sebesar 99%. Dari hasil pemeriksaan diperoleh hasil sebesar 99,32% diatas persyaratan dengan demikian kedua jenis aspal diatas memenuhi persyaratan.

h. Pemeriksaan berat jenis aspal

Berat jenis merupakan perbandingan antara berat aspal dengan berat air suling dengan volume yang sama. Persyaratan yang ditentukan untuk berat jenis aspal adalah 1 gr/cc. Dari hasil pemeriksaan kedua jenis aspal diatas menunjukkan hasil diatas persyaratan, sehingga aspal ex Pertamina dapat digunakan dalam penelitian sebagai bahan ikat pada campuran Laston tipe X.

Secara keseluruhan pemeriksaan terhadap sifat-sifat fisik aspal Pen.(60/70) ex Pertamina telah memenuhi standar spesifikasi aspal penetrasi 60/70.

Pengujian *Marshall* dan ISS dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama adalah untuk mencari Kadar aspal optimum, dengan membuat variasi kadar aspal dari 4.5% sampai dengan 6.5%, Sedangkan Tahap kedua untuk mencari nilai karakteristik *Marshall* dan ISS campuran pada kondisi standar dengan menetapkan kadar aspal hasil *reclaimed* sebesar 3%, dan menambahkan kadar aspal baru bervariasi mulai 1.5% sampai dengan 4%, sedangkan agregat digunakan agregat hasil bongkaran dan agregat baru.

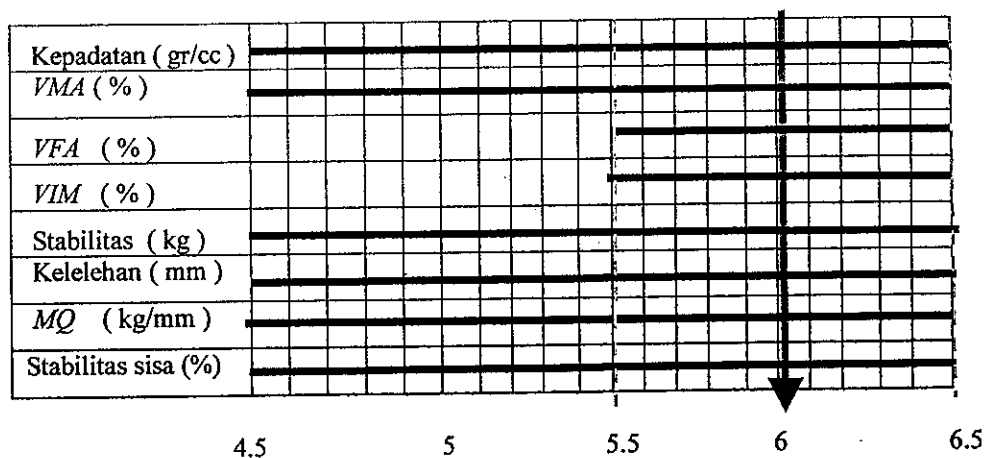
4.2.3. Hasil Pengujian *Marshall* dan Indeks Stabilitas Sisa (ISS) Tahap I pada Kadar Aspal Optimum.

Pada tahap pertama disiapkan masing-masing dua jenis sampel untuk masing-masing kondisi *Dry* dan *Soaked*, dengan pembuatan benda uji dilakukan pada kadar aspal optimum perkiraan sebesar 5.5 % terhadap total agregat dan dilakukan variasi kadar aspal pada 4.5 %, 5.0 %, 6.0 %, 6.5 %. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.13 dan hasil secara lengkap terdapat pada Lampiran C2 sampai dengan Lampiran E1.

Tabel 4.13. Hasil Test *Marshall* Campuran Laston tipe X

No	Karakteristik	Syarat	% Kadar aspal terhadap total agregat				
			4.5	5	5.5	6	6.5
1	Kepadatan (gr/cc)	-	2.286	2.291	2.307	2.311	2.299
2	<i>VMA</i> (%)	min 14	14.87	15.10	14.91	15.17	15.98
3	<i>VFA</i> (%)	min 65	46.36	55.66	66.98	76.0	81.20
4	<i>VIM</i> (%)	3 – 5	7.99	6.69	4.93	3.64	3
5	Stabilitas (kg)	min 750	1188	1246	1268	1290	1191
6	Kelelehan (mm)	2 – 4	2.79	2.70	2.68	2.61	2.75
7	<i>MQ</i> (kg/mm)	200 – 500	426.3	462.8	477	498	435
8	Stabilitas sisa (%)	75 %	87	88	91	91	90

Dari nilai karakteristik campuran yang dihasilkan pada test *Marshall* tersebut diatas pada tahap I, sesuai hasil analisa seperti pada Tabel 4.13, yang memenuhi syarat untuk *VMA* pada kadar aspal 4.5% - 6.5%, *VFA* pada kadar aspal 5.5% - 6.5% dan *VIM* pada kadar aspal 5.5% - 6.5%, ditentukan kadar aspal optimum pada 6 %. Seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Penentuan Kadar Aspal Optimum Pen.60/70

4.2.4. Hasil Pengujian *Marshall* dan Indeks Stabilitas Sisa (ISS) Tahap II pada kondisi standar

Selanjutnya pada penelitian tahap II yaitu untuk mencari nilai karakteristik *Marshall* dan ISS campuran pada kondisi standar dengan menetapkan kadar aspal hasil *reclaimed* sebesar 3%, dan menambahkan kadar aspal baru bervariasi mulai 1.5% sampai dengan 4%, sedangkan agregat digunakan agregat hasil bongkaran/lama dan agregat baru.

Pada tahap II, juga disiapkan masing-masing dua jenis sampel untuk kondisi *Dry* dan *Soaked*, dengan pembuatan benda uji dilakukan pada kadar aspal 4.5%, 5%, 5.5% kadar aspal optimum 6 %, kadar aspal 6.5% dan 7%, dan Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.14, hasil secara lengkap terdapat pada Lampiran C.

Tabel 4.14. Hasil Pengujian *Marshall* Campuran Laston tipe X Tahap II pada kondisi standar

Karakteristik	Hasil Bongkaran /Agregat lama						Agregat baru					
	4.5	5	5.5	6	6.5	7	4.5	5	5.5	6	6.5	7
Kepadatan (gr/cc)	2.266	2.269	2.270	2.269	2.246	2.245	2.275	2.276	2.305	2.307	2.298	2.298
VMA (%)	13.86	14.13	14.51	14.94	16.22	16.65	15.27	15.64	14.95	15.30	16.00	16.41
VFA (%)	53.10	62.46	71.28	79.22	81.36	88.13	44.84	53.39	66.77	75.23	81.05	88.22
VIM (%)	6.55	5.31	4.17	3.11	3.02	1.98	8.43	7.29	4.97	3.79	3.03	1.94
Stabilitas (kg)	1200	1234	1242	1265	1197	1034	1206	1245	1268	1274	1237	1219
Kelelahan (mm)	3.41	3.16	3.11	3.09	3.13	3.19	3.19	3.14	3.10	3.04	3.16	3.24
MQ (kg/mm)	352.5	390.1	400	411.8	384.4	333.6	379	400.9	411.9	425.3	394.2	378.8
Stabilitas sisa (%)	88	88	91	91	89	89	90	90	92	92	90	80

4.3. Pembahasan

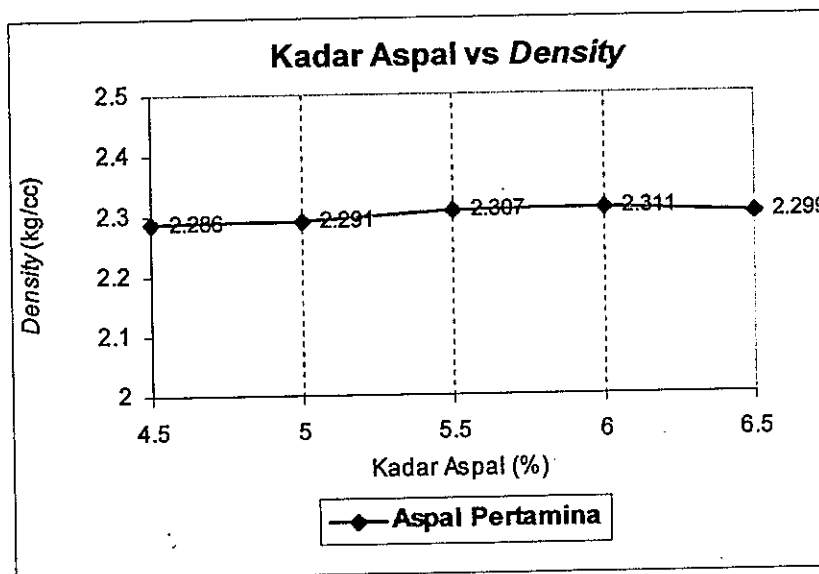
4.3.1. Pengaruh Kadar Aspal pada Laston tipe X dari Pengujian *Marshall* dan ISS Tahap I

- a. Pengaruh Kadar Aspal terhadap nilai *Density* campuran Laston tipe X.

Nilai *Density* menunjukkan besarnya kerapatan suatu campuran yang sudah dipadatkan. Faktor yang mempengaruhi *density* adalah temperatur pemadatan, gradasi, kadar *filler*, energi pemadat, kadar aspal, dan *VMA*. Campuran dengan kepadatan yang tinggi akan lebih mampu menahan beban yang lebih tinggi. Nilai *density* campuran Laston tipe X dapat dilihat pada Tabel 4.15, dan Gambar 4.3. dibawah ini.

Tabel 4.15 Kadar Aspal terhadap Nilai *Density* campuran Laston tipe X

Karakteristik	Spesifikasi (%)	Kadar Aspal (%)				
		4.5	5	5.5	6	6.5
<i>Density</i>	-	2.286	2.291	2.307	2.311	2.299



Gambar 4.3. Grafik hubungan Kadar Aspal vs *Density*

Seperti terlihat pada Tabel 4.15. dan Gambar 4.3. terlihat bahwa semakin meningkatnya kadar aspal, nilai *density* cenderung meningkat sampai batas maksimum dan selanjutnya menurun, salah satu sebab apabila campuran dipadatkan kadar aspal akan mengisi rongga antar partikel yang terbentuk, semakin

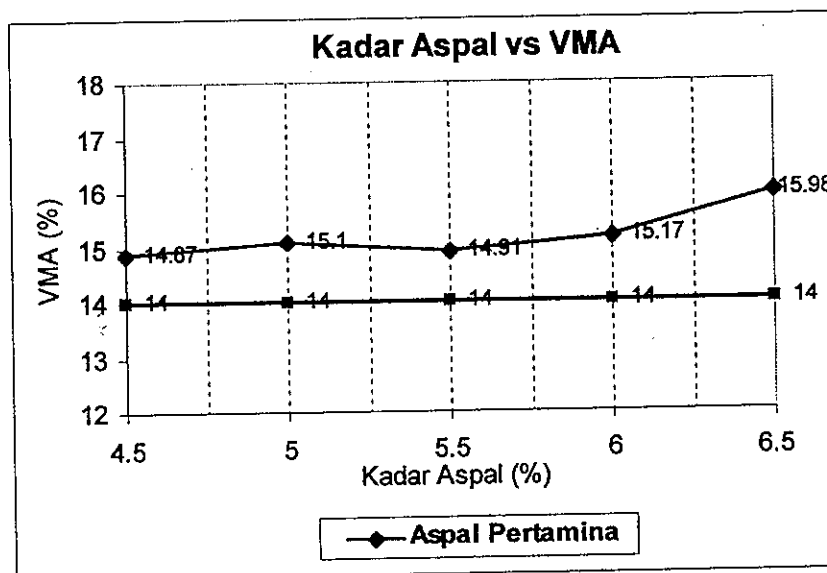
banyak rongga-rongga yang terisi membuat kerapatan/*density* semakin tinggi sampai batas optimum, yang kemudian akan menurun yang disebabkan kadar aspal bebas semakin berkurang karena terlalu banyak menyelimuti butiran agregat. Dalam spesifikasi untuk campuran laston tidak ada persyaratan khusus mengenai tingkat *density*. Sebagai acuan disarankan tingkat *density* > 2 gr/cc.

- b. Pengaruh Kadar Aspal terhadap nilai *Void in Mineral Agreggate (VMA)* campuran Laston tipe X.

Void in Mineral Agreggate (VMA) adalah rongga udara yang ada diantara mineral agregat di dalam campuran beraspal panas yang sudah dipadatkan termasuk ruang yang terisi aspal. *VMA* digunakan sebagai ruang untuk menampung aspal dan volume rongga udara yang diperlukan dalam campuran beraspal panas. Besarnya nilai *VMA* dipengaruhi oleh kadar aspal, gradasi bahan susun, jumlah tumbukan dan temperatur pemadatan. Hubungan antara kadar aspal dengan *VMA* dapat dilihat pada Tabel 4.16. dan Gambar 4.4, dibawah ini.

Tabel 4.16 Kadar Aspal terhadap Nilai *VMA* campuran Laston tipe X

Karakteristik	Spesifikasi (%)	Kadar Aspal (%)				
		4.5	5	5.5	6	6.5
<i>VMA</i>	Min.14	14.87	15.10	14.91	15.17	15.98



Gambar 4.4. Grafik hubungan Kadar Aspal dan *VMA*

Dari Tabel 4.16. dan Gambar 4.4. di atas dapat dilihat bahwa campuran semakin bertambahnya kadar aspal, nilai *VMA* semakin besar, ini disebabkan karena jumlah kadar aspal yang masuk kedalam rongga masih cukup tempat untuk mengisi rongga. Dalam penelitian ini nilai *VMA* yang memenuhi syarat $> 14 \%$.

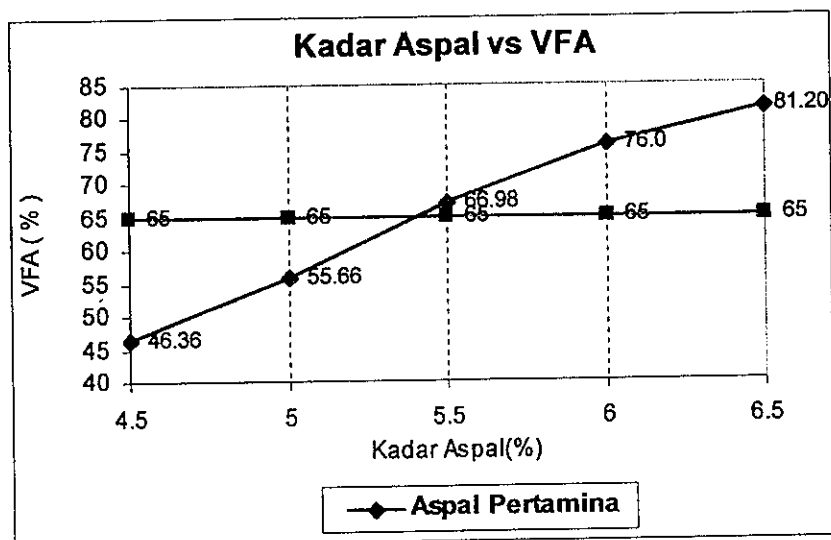
- c. Pengaruh Kadar Aspal terhadap nilai *Void Filled with Asphalt (VFA)* campuran Laston tipe X.

Nilai *VFA* menunjukkan prosentase besarnya rongga yang dapat terisi oleh aspal. Besarnya nilai *VFA* menentukan keawetan suatu campuran beraspal panas, semakin besar nilai *VFA* akan menunjukkan semakin kecil nilai *VIM* yang berarti rongga yang terisi aspal semakin banyak, oleh karena itu campuran beraspal panas akan semakin awet. Begitu sebaliknya apabila *VFA* terlalu kecil, maka rongga yang terisi aspal akan semakin sedikit sehingga agregat yang terselimuti aspal akan tipis yang menyebabkan campuran beraspal panas tidak awet.

Hubungan antara kadar aspal dengan nilai *VFA* dapat dilihat pada Tabel 4.17 dan Gambar 4.5, dibawah ini :

Tabel 4.17. Kadar Aspal terhadap Nilai *VFA* campuran Laston tipe X

Karakteristik	Spesifikasi (%)	Kadar Aspal (%)				
		4.5	5	5.5	6	6.5
<i>VFA</i>	Min.65	46.36	55.66	66.98	76.0	81.20



Gambar 4.5. Grafik hubungan Kadar Aspal dan *VFA*

Dari Tabel 4.17 dan Gambar 4.5. diatas dapat dilihat bahwa pada campuran Laston tipe X mempunyai nilai *VFA* naik seiring bertambahnya kadar aspal. *VFA* menunjukkan jumlah kandungan aspal yang mengisi rongga didalam campuran. *VFA* yang rendah berarti jumlah aspal efektif yang mengisi rongga antar butir agregat sedikit, berarti volume rongga udaranya besar. Hal ini akan mengurangi keawetan dari campuran beraspal panas, dan sebaliknya nilai *VFA* yang terlalu tinggi akan menyebabkan *bleeding* karena rongga antar butiran terlalu kecil.

Dalam penelitian ini syarat nilai *VFA* untuk campuran Laston tipe X > 65%, didapat pada kadar aspal 5.5% -6.5%

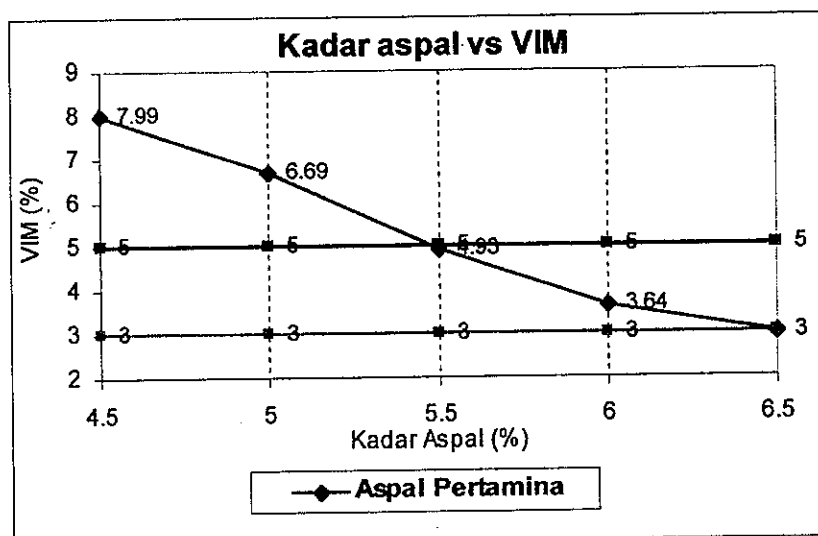
d. Pengaruh Kadar Aspal terhadap nilai *Void In the Mix (VIM)* Laston tipe X

VIM menyatakan banyaknya prosentase rongga dalam campuran total. Nilai rongga dalam campuran dipengaruhi oleh kadar aspal pada campuran beraspal panas, dengan bertambahnya kadar aspal, maka jumlah aspal yang dapat mengisi rongga antar butiran agrgat semakin bertambah, sehingga volume rongga dalam campuran semakin berkurang.

Hubungan antara kadar aspal dengan nilai *VIM* dapat dilihat pada Tabel 4.18 dan Gambar 4.6, dibawah ini :

Tabel 4.18 Kadar Aspal terhadap Nilai *VIM* campuran Laston tipe X

Karakteristik	Spesifikasi (%)	Kadar Aspal (%)				
		4.5	5	5.5	6	6.5
<i>VIM</i>	3 - 5	7.99	6.69	4.93	3.64	3.0



Gambar 4.6. Grafik hubungan Kadar Aspal dan *VIM*

Dari Tabel 4.18. dan Gambar 4.6. diatas dapat dilihat bahwa pada campuran Laston tipe X menunjukkan bahwa nilai *VIM* yang rendah berarti rongga yang ada pada campuran kecil, sehingga tidak tersedia ruang yang cukup, dimungkinkan aspal akan naik kepermukaan. Sebaliknya nilai *VIM* yang tinggi akan menyebabkan campuran kurang kedap air dan udara, dimungkinkan campuran tidak awet. Dalam penelitian ini syarat nilai *VIM* untuk campuran Laston tipe X 3% - 5%, didapat pada kadar aspal 5.5% -6.5%

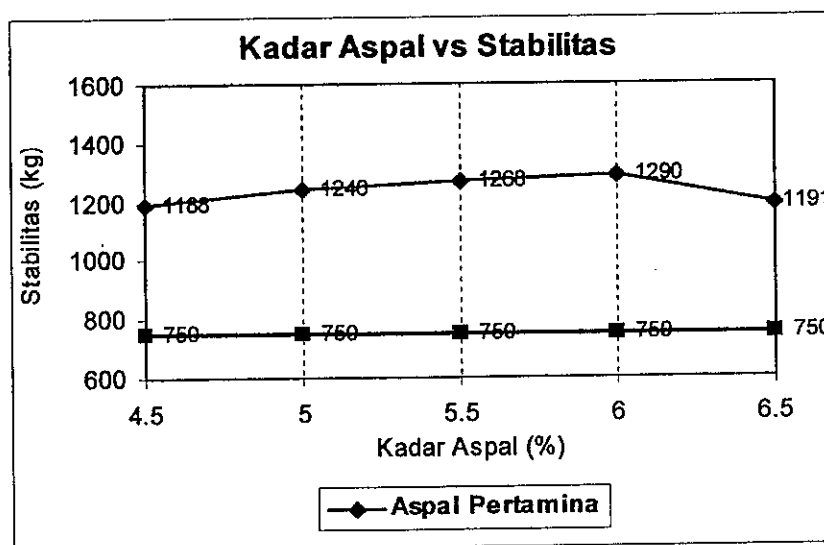
e. Pengaruh Kadar Aspal terhadap Stabilitas campuran Laston tipe X

Stabilitas adalah besarnya beban maksimum yang dapat dicapai oleh bahan susun campuran beraspal panas yang dinyatakan dalam satuan beban. Stabilitas merupakan indikator kekuatan lapis perkerasan dalam memikul beban lalu lintas. > 1.000.000 *ESA*, stabilitas minimum yang disyaratkan adalah 750 kg. Lapis Laston tipe X dengan stabilitas dibawah 750 kg akan mudah terjadi alur (*rutting*) bila dilalui kendaraan berat.

Hubungan antara kadar aspal dengan nilai stabilitas dapat dilihat pada Tabel 4.19 dan Gambar 4.7, dibawah ini :

Tabel 4.19 Kadar Aspal terhadap Nilai Stabilitas campuran Laston tipe X

Karakteristik	Spesifikasi (kg)	Kadar Aspal (%)				
		4.5	5	5.5	6	6.5
Stabilitas	Min. 750	1188	1246	1268	1290	1191



Gambar 4.7. Grafik hubungan Kadar Aspal dan Stabilitas

Dari Tabel 4.19. dan Gambar 4.7. diatas dapat dilihat bahwa nilai stabilitas pada campuran Laston tipe X berada diatas stabilitas minimal 750 kg yang disyaratkan. Hal ini terkait pada kinerja nilai *Density*, *VMA*, *VFA*, *VIM*, seperti ditunjukkan pada kadar aspal sampai 6% stabilitas naik sampai 1290 kg. Selanjutnya stabilitas turun yang menunjukkan terlalu tebal film aspal yang menyelimuti agregat, sehingga stabilitas menjadi menurun. Secara keseluruhan stabilitas naik dengan bertambahnya kadar aspal sampai batas tertentu, begitu juga apabila penambahan kadar aspal melebihi batas justru akan menurunkan nilai stabilitas.

f. Pengaruh Kadar Aspal terhadap *Flow* campuran Laston tipe X

Kelelehan (*Flow*) adalah besarnya penurunan campuran benda uji akibat suatu beban sampai batas runtuh yang dinyatakan dalam satuan mm. *flow* merupakan indikator kelenturan campuran beraspal panas dalam menahan beban lalu lintas.

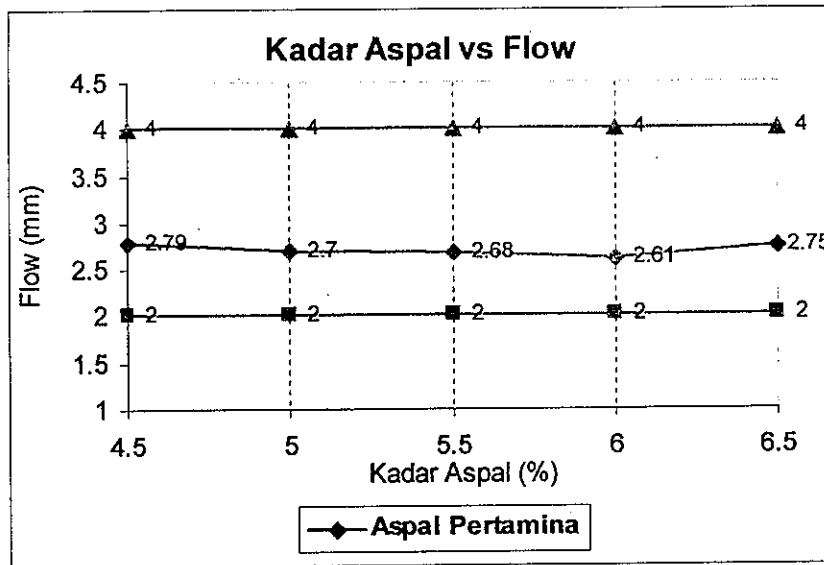
Nilai *flow* menyatakan besarnya deformasi bahan susun benda uji, campuran yang mempunyai angka *flow* rendah dengan stabilitas tinggi akan cenderung menghasilkan campuran beraspal panas yang kaku dan getas, sehingga akan mudah retak apabila terkena beban lalu lintas yang tinggi dan berat. Sebaliknya apabila campuran beraspal panas mempunyai *flow* terlalu tinggi maka akan bersifat plastis sehingga mudah berubah bentuk (*deformasi plastis*) akibat beban lalu lintas yang tinggi dan berat.

Spesifikasi menetapkan untuk campuran Laston tipe X yang dilalui oleh > 1.000.000 *ESA*, *flow* disyaratkan 2mm – 4mm. Nilai *flow* dipengaruhi beberapa faktor seperti gradasi bahan susun, kadar aspal, viskositas aspal,

Hubungan antara kadar aspal dengan nilai *flow* dapat dilihat pada Tabel 4.20. dan Gambar 4.8, dibawah ini :

Tabel 4.20. Kadar Aspal terhadap Nilai *Flow* campuran tipe X

Karakteristik	Spesifikasi (mm)	Kadar Aspal (%)				
		4.5	5	5.5	6	6.5
<i>Flow</i>	2mm – 4mm	2.79	2.70	2.68	2.61	2.75



Gambar 4.8. Grafik hubungan Kadar Aspal dan *Flow*

Dari Tabel 4.20. dan Gambar 4.8. diatas dapat dilihat bahwa pada campuran Laston tipe X berada diantara *flow* 2mm – 4mm yang disyaratkan. Seperti hal stabilitas, *flow* terkait pada kinerja nilai *Density*, *VMA*, *VFA*, *VIM*, dan merupakan kebalikan dari stabilitas, karena *flow* menggambarkan nilai fleksibilitas/kelenturan suatu campuran, seperti ditunjukkan pada kadar aspal sampai 6% *flow* turun sampai 2.61mm. Selanjutnya stabilitas naik yang menunjukkan terlalu tebal film aspal yang menyelimuti agregat, sehingga *flow* menjadi naik. Secara keseluruhan *flow* turun dengan bertambahnya kadar aspal sampai batas tertentu, begitu juga apabila penambahan kadar aspal melebihi batas justru akan menaikkan nilai *flow*.

g. Pengaruh Kadar Aspal terhadap *Marshall Quotient* campuran Laston tipe X

Marshall Quotient (MQ) merupakan hasil bagi antara stabilitas dan *flow* yang mengindikasikan pendekatan terhadap stabilitas dan fleksibilitas dari suatu campuran beraspal panas. Besarnya nilai *MQ* tergantung dari besarnya nilai stabilitas yang dipengaruhi oleh gesekan antar butiran dan saling mengunci antar butiran yang terjadi antara partikel agregat dan kohesi campuran bahan susun, serta nilai *flow* yang dipengaruhi oleh viskositas, kadar aspal, gradasi bahan susun, dan jumlah tumbukan.

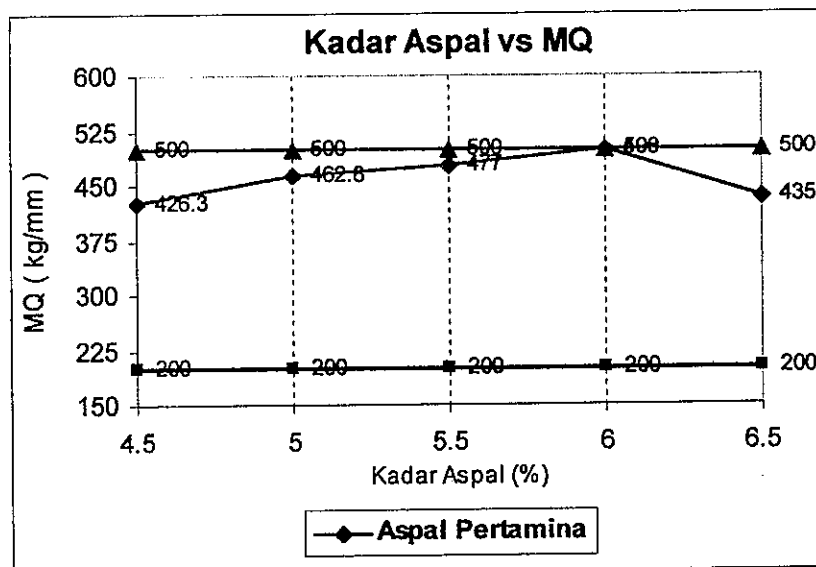
Campuran yang memiliki nilai *MQ* yang rendah, maka campuran beraspal panas akan semakin fleksibel, cenderung menjadi plastis dan lentur sehingga mudah

mengalami perubahan bentuk pada saat menerima beban lalu lintas yang tinggi. Sedangkan campuran yang memiliki nilai MQ tinggi campuran beraspal panas akan kaku dan kurang lentur. Faktor yang mempengaruhi nilai MQ adalah gradasi bahan susun, bentuk butir, kadar aspal, kohesi, energi pemadatan, dan temperatur pemadatan.

Hubungan antara kadar aspal dengan nilai MQ dapat dilihat pada Tabel 4.21 dan Gambar 4.9, dibawah ini :

Tabel 4.21 Kadar Aspal terhadap Nilai *Marshall Quotient* campuran Laston tipe X

Karakteristik	Spesifikasi (kg/mm)	Kadar Aspal (%)				
		4.5	5	5.5	6	6.5
MQ	200 - 500	426.3	462.8	477	498	435



Gambar 4.9. Grafik hubungan Kadar Aspal dan *Marshall Quotient*

Dari Tabel 4.21. dan Gambar 4.9. diatas dapat dilihat bahwa pada campuran Laston tipe X sesuai spesifikasi berada diantara MQ yang disyaratkan antara 200kg/mm – 500 kg/mm.

h. Pengaruh Kadar Aspal terhadap Indeks Stabilitas Sisa campuran Laston tipe X

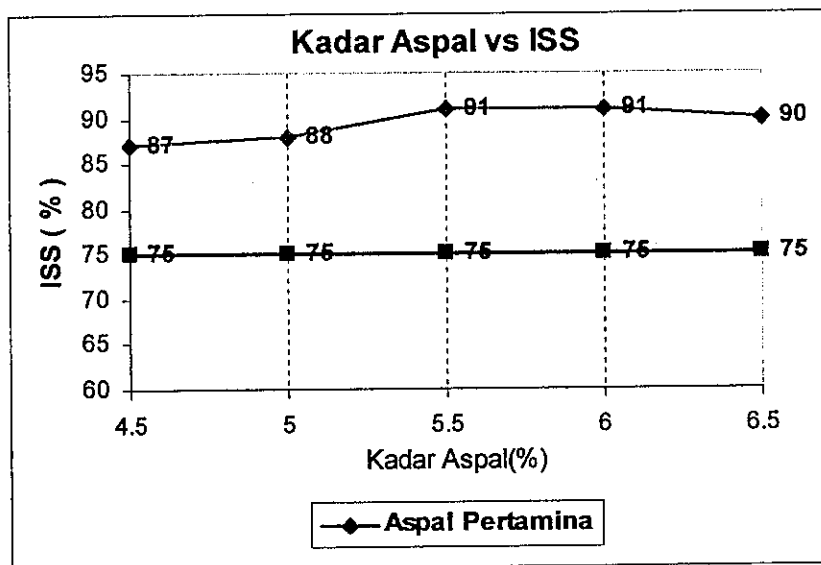
Nilai Indeks Stabilitas Sisa diperoleh dengan membandingkan antara nilai stabilitas pada kondisi standar yaitu direndam dalam *waterbath* pada suhu 60° C selama 30 (tigapuluh) menit dengan kondisi perendaman yang sama selama

24(duapuluhempat) jam ini mengindikasikan pendekatan terhadap keawetan (durabilitas) dari suatu campuran beraspal panas.

Hubungan antara kadar aspal dengan nilai Indeks Stabilitas Sisa dapat dilihat pada Tabel 4.22 dan Gambar 4.10, dibawah ini :

Tabel 4.22 Kadar Aspal terhadap Nilai Indeks Stabilitas Sisa campuran Laston tipe X

Karakteristik	Spesifikasi (%)	Kadar Aspal (%)				
		4.5	5	5.5	6	6.5
ISS	Min. 75	87	88	91	91	90



Gambar 4.10. Grafik hubungan Kadar Aspal dan ISS

Dari Tabel 4.22 dan Gambar 4.10. diatas dapat dilihat bahwa pada campuran Laston tipe X berada diatas ISS minimal 75 % untuk beban lalu lintas diatas 1.000.000 *ESA* yang disyaratkan,

Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran beraspal panas yang mengalami perendaman dengan suhu 60⁰ C selama 24 jam dibandingkan dengan perendaman standar akan mengalami penurunan nilai stabilitas. Hal ini disebabkan karena selama proses perendaman terindikasi terdapat air yang masuk kepori-pori campuran, sehingga berpengaruh pada sifat adhesi dan kohesi aspal yang akan mengurangi daya ikat aspal terhadap agregat.

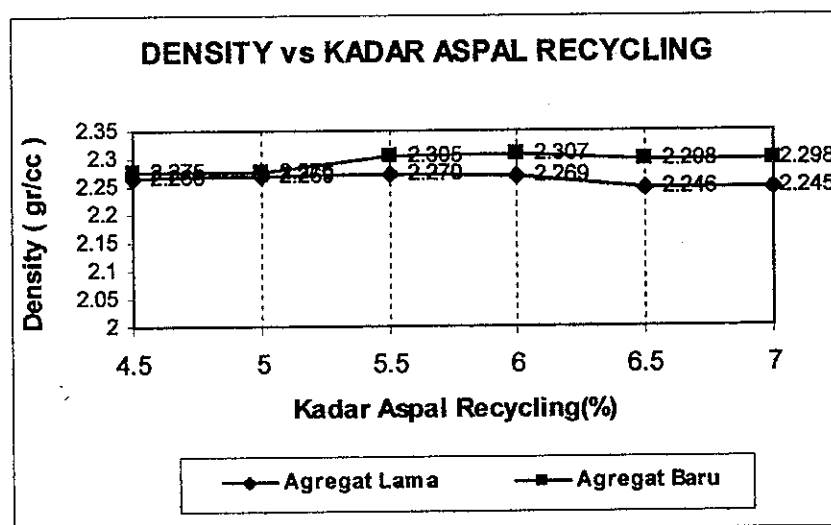
4.3.2. Pengaruh Pengujian *Marshall* dan ISS Tahap II pada Agregat Baru dan Agregat lama / hasil bongkaran Campuran Laston tipe X dengan penetapan kadar aspal hasil *Reclaimed* dan variasi kadar aspal baru.

- a. Pengaruh gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama campuran Laston tipe X terhadap nilai *density* pada variasi kadar Aspal *recycling*

Nilai *density* menunjukkan besarnya kerapatan suatu campuran yang sudah dipadatkan. Faktor yang mempengaruhi kepadatan adalah temperatur pemadatan, gradasi, kadar *filler*, energi pemadat dan kadar aspal, porositas butiran. Campuran dengan kepadatan yang tinggi akan lebih mampu menahan beban yang lebih tinggi. Pengaruh gradasi dan jenis agregat terhadap nilai *density* pada variasi kadar Aspal *recycling* dapat dilihat pada Tabel 4.23, dan Gambar 4.11,

Tabel 4.23. Pengaruh gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai *density* pada variasi kadar Aspal *recycling*

Jenis Agregat	Syarat (gr/cc)	Kadar Aspal(%)					
		1.5+3	2+3	2.5+3	3+3	3.5+3	4+3
		Nilai <i>Density</i> (gr/cc)					
Agregat Baru	-	2.275	2.276	2.305	2.307	2.298	2.298
Agregat bongkaran / lama	-	2.266	2.269	2.270	2.269	2.246	2.245



Gambar 4.11. Grafik hubungan gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai *density* pada variasi kadar Aspal *recycling*

Seperti terlihat pada Tabel 4.23 dan Gambar 4.11, Peningkatan kadar aspal *recycling* mengakibatkan meningkatnya nilai *density* campuran Laston tipe X.

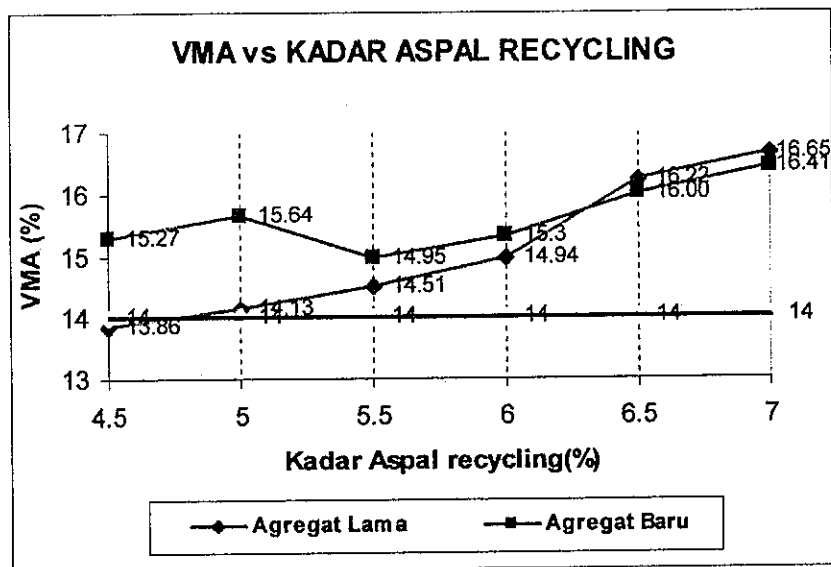
terlihat bahwa *density* campuran dengan menggunakan agregat baru pada kadar aspal *recycling* optimum 2.307 gr/cc lebih baik daripada menggunakan agregat hasil bongkaran/lama pada kadar aspal *recycling* optimum 2.269 gr/cc. Dengan semakin meningkatnya kadar aspal, nilai *density* cenderung meningkat sampai batas maksimum dan selanjutnya menurun, salah satu sebab apabila campuran dipadatkan kadar aspal akan mengisi rongga antar partikel yang terbentuk, semakin banyak rongga-rongga yang terisi membuat kerapatan/*density* semakin tinggi sampai batas optimum, yang kemudian akan menurun yang disebabkan kadar aspal bebas semakin berkurang karena terlalu banyak menyelimuti butiran agregat. Dalam spesifikasi untuk campuran laston tidak ada persyaratan khusus mengenai tingkat *density*. Sebagai acuan disarankan tingkat *density* > 2 gr/cc.

- b. Pengaruh gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama campuran Laston tipe X terhadap nilai *VMA* pada variasi kadar Aspal *recycling*

VMA adalah rongga udara yang ada diantara mineral agregat di dalam campuran beraspal panas yang sudah dipadatkan termasuk ruang yang terisi aspal. *VMA* digunakan sebagai ruang untuk menampung aspal dan volume rongga udara yang diperlukan dalam campuran beraspal panas. Besarnya nilai *VMA* dipengaruhi oleh kadar aspal, gradasi bahan susun, jumlah tumbukan dan temperatur pemadatan. Pengaruh gradasi dan jenis agregat terhadap nilai *VMA* pada variasi kadar Aspal *recycling* dapat dilihat pada Tabel 4.24, dan Gambar 4.12, dibawah ini :

Tabel 4.24. Pengaruh gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai *VMA* pada variasi kadar Aspal *recycling*

Jenis Agregat	Syarat (%)	Kadar Aspal(%)					
		1.5+3	2+3	2.5+3	3+3	3.5+3	4+3
		Nilai <i>VMA</i> (%)					
Agregat Baru	min 14	15.27	15.64	14.95	15.30	16.0	16.41
Agregat bongkaran / lama	min 14	13.86	14.13	14.51	14.94	16.22	16.65



Gambar 4.12. Grafik hubungan gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai *VMA* pada variasi kadar Aspal *recycling*

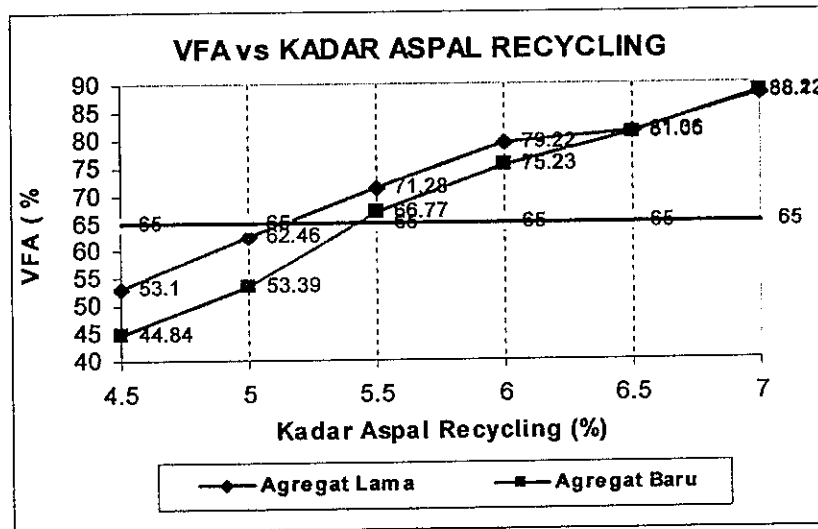
Dari Tabel 4.24 dan Gambar 4.12, di atas dapat dilihat bahwa nilai *VMA* campuran dengan menggunakan agregat hasil bongkaran/lama pada kadar aspal *recycling* optimum 14.94 %, sedangkan nilai *VMA* menggunakan agregat baru pada kadar aspal *recycling* optimum 15.30 %. Dengan semakin bertambahnya kadar aspal, nilai *VMA* semakin besar, ini disebabkan karena jumlah kadar aspal *recycling* yang masuk kedalam rongga masih cukup tempat untuk mengisi rongga. Dalam penelitian ini nilai *VMA* yang memenuhi syarat > 14 %.

- c. Pengaruh gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama campuran Laston tipe X terhadap nilai *VFA* pada variasi kadar Aspal *recycling*.

Nilai *VFA* menunjukkan prosentase besarnya rongga yang dapat terisi oleh aspal. Besarnya nilai *VFA* menentukan keawetan suatu campuran beraspal panas, semakin besar nilai *VFA* akan menunjukkan semakin kecil nilai *VIM* yang berarti rongga yang terisi aspal semakin banyak, oleh karena itu campuran beraspal panas akan semakin awet. Begitu sebaliknya apabila *VFA* terlalu kecil, maka rongga yang terisi aspal akan semakin sedikit sehingga agregat yang terselimuti aspal akan tipis yang menyebabkan campuran beraspal panas tidak awet. Pengaruh gradasi dan jenis agregat terhadap nilai *VFA* pada variasi kadar Aspal *recycling* dapat dilihat pada Tabel 4.25 dan Gambar 4.13, dibawah ini :

Tabel 4.25. Pengaruh gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai *VFA* pada variasi kadar Aspal *recycling*

Jenis Agregat	Syarat (%)	Kadar Aspal(%)					
		1.5+3	2+3	2.5+3	3+3	3.5+3	4+3
		Nilai <i>VFA</i> (%)					
Agregat Baru	min 65	44.84	53.39	66.77	75.23	81.05	88.22
Agregat bongkaran/lama	min 65	53.10	62.46	71.28	79.22	81.36	88.13



Gambar 4.13. Grafik hubungan gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai *VFA* pada variasi kadar Aspal *recycling*

Dari Tabel 4.25 dan Gambar 4.13, di atas dapat dilihat bahwa nilai *VFA* campuran dengan menggunakan agregat hasil bongkaran/lama pada kadar aspal *recycling* optimum 79.22 % sedangkan nilai *VFA* menggunakan agregat baru pada kadar aspal *recycling* optimum 75.23 %. Perbedaan nilai *VFA* timbul disebabkan penyerapan agregat baru lebih besar dari agregat lama, sehingga cukup menyerap banyak kadar aspal. Dengan semakin bertambahnya kadar aspal, nilai *VFA* semakin besar, ini menunjukkan agregat terselimuti aspal secara sempurna sehingga campuran Laston tipe X akan lebih kedap air maupun udara, sehingga tidak mudah teroksidasi pada akhirnya akan meningkatkan durabilitas campuran Laston tipe X. Namun sebaliknya apabila nilai *VFA* kecil, maka kekedapan campuran terhadap air maupun udara akan berkurang sehingga mudah teroksidasi yang selanjutnya akan menurunkan durabilitas campuran serta akan mengakibatkan mudah terjadi deformasi plastis. Sebagai persyaratan untuk nilai *VFA* campuran Laston tipe X minimal 65 %. Pada campuran dengan menggunakan agregat hasil bongkaran/lama dan menggunakan agregat baru yang memenuhi syarat pada 5.5% - 7%.

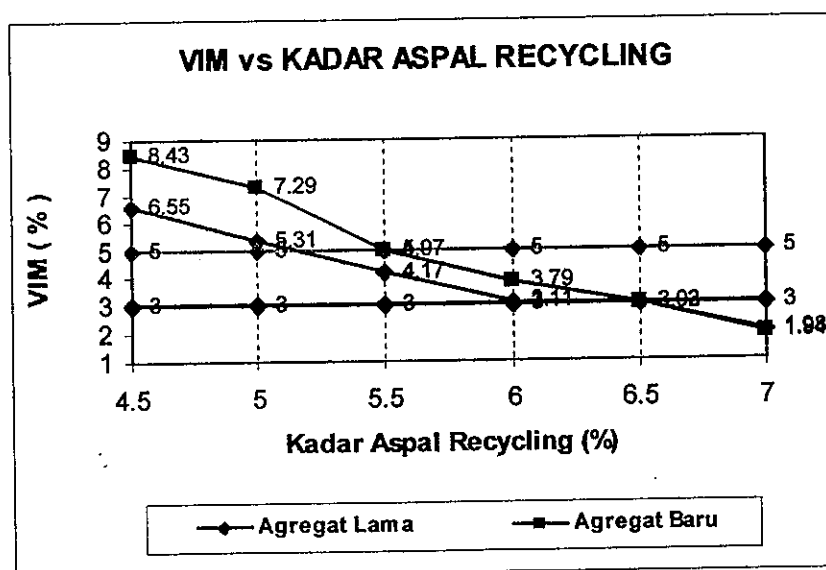
- d. Pengaruh gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama campuran Laston tipe X terhadap nilai *VIM* pada variasi kadar Aspal *recycling*.

VIM dalam spesifikasi Laston merupakan syarat paling penting, selain *VMA* dan *VFA* sebagai dasar dari perencanaan perhitungan pada tahap II. *VIM* menyatakan banyaknya prosentase rongga dalam campuran total. Nilai rongga dalam campuran dipengaruhi oleh kadar aspal pada campuran, dengan bertambahnya kadar aspal, maka jumlah aspal yang dapat mengisi rongga antar butiran agregat semakin bertambah, sehingga volume rongga dalam campuran semakin berkurang.

Pengaruh gradasi dan jenis agregat terhadap nilai *VIM* pada variasi kadar Aspal *recycling* dapat dilihat pada Tabel 4.26, dan Gambar 4.14. dibawah :

Tabel 4.26. Pengaruh gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai *VIM* pada variasi kadar Aspal *recycling*

Jenis Agregat	Syarat (%)	Kadar Aspal(%)					
		1.5+3	2+3	2.5+3	3+3	3.5+3	4+3
		Nilai <i>VIM</i> (%)					
Agregat Baru	3 – 5	8.43	7.29	4.97	3.79	3.03	1.94
Agregat bongkaran / lama	3 - 5	6.55	5.31	4.17	3.11	3.02	1.98



Gambar 4.14 Grafik hubungan gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai *VIM* pada variasi kadar Aspal *recycling*

Dari Tabel 4.26 dan Gambar 4.14, di atas dapat dilihat bahwa nilai *VIM* campuran dengan menggunakan agregat hasil bongkaran/lama pada kadar aspal *recycling* optimum 3.11 % sedangkan nilai *VIM* menggunakan agregat baru pada kadar aspal

recycling optimum 3.79 %. Ini disebabkan perbedaan berat jenis agregat kasar dan halus, dan tingkat penyerapan. *VIM* merupakan prosentase rongga udara pada suatu campuran yang telah dipadatkan, serta menunjukkan bahwa nilai *VIM* yang rendah berarti rongga yang ada pada campuran menjadi rapat, sehingga tidak tersedia ruang yang cukup, dimungkinkan aspal akan naik kepermukaan. Sebaliknya nilai *VIM* yang tinggi akan menyebabkan campuran kurang rapat dan tidak kedap air dan udara, dimungkinkan campuran tidak awet. Dalam penelitian ini syarat nilai *VIM* untuk campuran Laston tipe X 3% - 5%

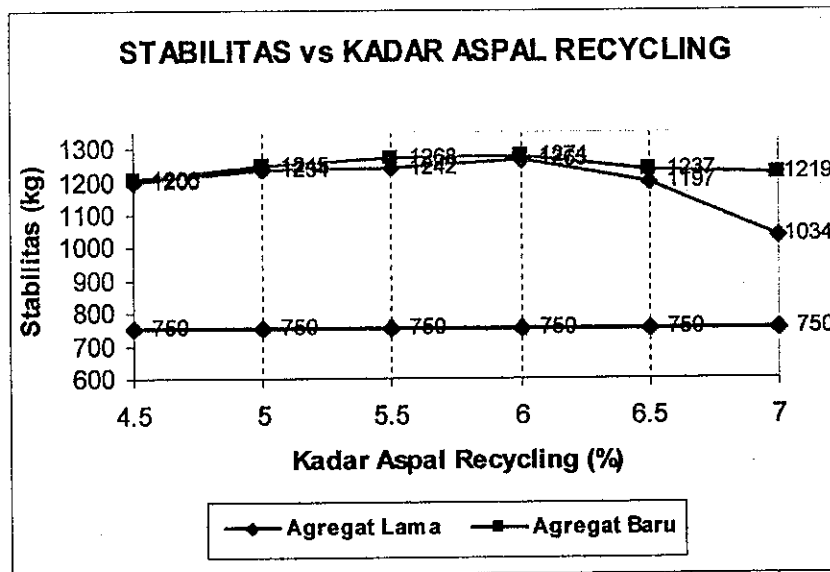
- e. Pengaruh gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama campuran Laston tipe X terhadap nilai Stabilitas pada variasi kadar Aspal *recycling*.

Stabilitas adalah besarnya beban maksimum yang dapat dicapai oleh bahan susun campuran beraspal panas yang dinyatakan dalam satuan beban. Stabilitas merupakan indikator kekuatan lapis perkerasan dalam memikul beban lalu lintas. Spesifikasi Laston tipe X yang dilalui oleh > 1.000.000 *ESA*, stabilitas minimum yang disyaratkan adalah 750 kg. Lapis Laston dengan stabilitas dibawah 750 kg akan mudah terjadi alur (*rutting*) bila dilalui kendaraan berat.

Pengaruh gradasi, tes abrasi dan jenis agregat terhadap nilai Stabilitas pada variasi kadar Aspal *recycling* dapat dilihat pada Tabel 4.27, dan Gambar 4.15 dibawah :

Tabel 4.27. Pengaruh gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai stabilitas pada variasi kadar Aspal *recycling*

Jenis Agregat	Syarat (kg)	Kadar Aspal(%)					
		1.5+3	2+3	2.5+3	3+3	3.5+3	4+3
		Nilai Stabilitas (kg)					
Agregat Baru	750	1206	1245	1268	1274	1237	1219
Agregat bongkaran/ lama	750	1200	1234	1242	1265	1197	1034



Gambar 4.15. Grafik hubungan gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai Stabilitas pada variasi kadar Aspal *recycling*

Dari tabel 4.27 dan Gambar 4.15. diatas dapat dilihat bahwa nilai Stabilitas campuran dengan menggunakan agregat hasil bongkaran/lama pada kadar aspal *recycling* optimum 1265 kg sedangkan nilai Stabilitas menggunakan agregat baru pada kadar aspal *recycling* optimum 1274 kg. Nilai stabilitas pada campuran Laston tipe X berada diatas stabilitas minimal 750 kg yang disyaratkan. Hal ini terkait pada kinerja nilai *Density*, *VMA*, *VFA*, *VIM*, seperti ditunjukkan pada kadar aspal *recycling* optimum dan selanjutnya stabilitas turun, ini mengindikasikan terlalu tebal film aspal yang menyelimuti agregat, sehingga stabilitas menjadi menurun. Secara keseluruhan stabilitas naik dengan bertambahnya kadar aspal sampai batas tertentu, begitu juga apabila penambahan kadar aspal melebihi batas justru akan menurunkan nilai stabilitas. dapat diterima oleh karena nilai stabilitas berada diatas 750kg.

- f. Pengaruh gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama campuran Laston tipe X terhadap nilai *Flow* pada variasi kadar Aspal *recycling*.

Kelelehan (*Flow*) adalah besarnya penurunan campuran benda uji akibat suatu beban sampai batas runtuh yang dinyatakan dalam satuan mm. *flow* merupakan indikator kelenturan campuran beraspal panas dalam menahan beban lalu lintas.

Nilai *flow* menyatakan besarnya deformasi bahan susun benda uji, campuran yang mempunyai angka *flow* rendah dengan stabilitas tinggi akan cenderung

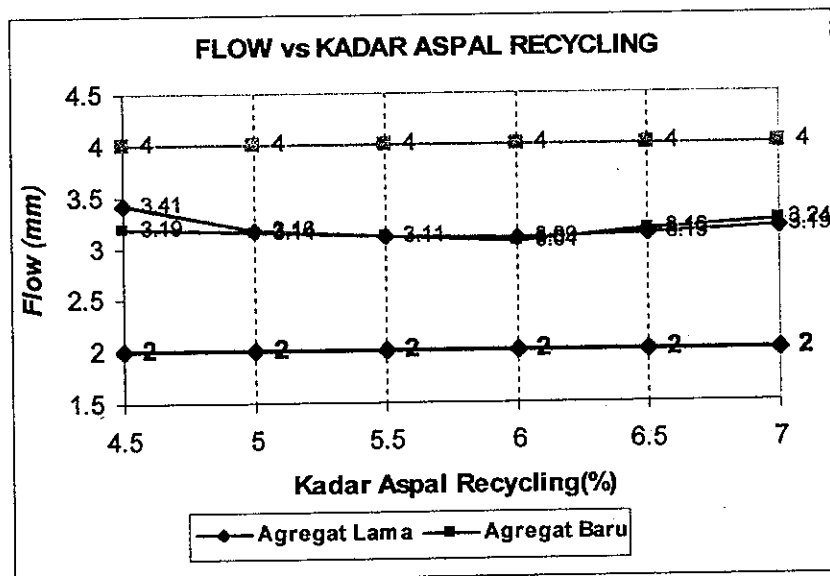
menghasilkan campuran beraspal panas yang kaku dan getas (*brittle*), sehingga akan mudah retak (*crack*) apabila terkena beban lalu lintas yang tinggi dan berat. Sebaliknya apabila campuran beraspal panas mempunyai *flow* terlalu tinggi maka akan bersifat plastis sehingga mudah berubah bentuk (deformasi plastis) akibat beban lalu lintas yang tinggi dan berat.

Spesifikasi menetapkan untuk campuran Laston tipe X yang dilalui oleh > 1.000.000 *ESA*, *flow* minimum yang disyaratkan (2 – 4) mm. Nilai *flow* dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti gradasi bahan susun, kadar aspal, viskositas aspal.

Pengaruh gradasi dan jenis agregat terhadap nilai Stabilitas pada variasi kadar Aspal *recycling* dapat dilihat pada Tabel 4.28 dan Gambar 4.16, dibawah ini :

Tabel 4.28. Pengaruh gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai *Flow* pada variasi kadar Aspal *recycling*

Jenis Agregat	Syarat (mm)	Kadar Aspal(%)					
		1.5+3	2+3	2.5+3	3+3	3.5+3	4+3
		Nilai <i>Flow</i> (mm)					
Agregat Baru	2 – 4	3.19	3.14	3.10	3.04	3.16	3.24
Agregat bongkaran / lama	2 - 4	3.41	3.16	3.11	3.09	3.13	3.19



Gambar 4.16 Grafik hubungan gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai *Flow* pada variasi kadar Aspal *recycling*

Dari Tabel 4.28 dan Gambar 4.16, di atas dapat dilihat bahwa nilai *Flow* campuran dengan menggunakan agregat hasil bongkaran/lama pada kadar aspal *recycling* optimum 3.09 mm sedangkan nilai Stabilitas menggunakan agregat baru pada kadar aspal *recycling* optimum 3.04 mm. Seperti hal stabilitas, *flow* terkait pada kinerja nilai *Density*, *VMA*, *VFA*, *VIM*, dan merupakan kebalikan dari stabilitas, karena *flow* menggambarkan nilai fleksibilitas/kelenturan suatu campuran, seperti ditunjukkan pada kadar aspal *recycling* optimum menurun. Selanjutnya stabilitas naik yang menunjukkan terlalu tebal film aspal yang menyelimuti agregat, sehingga *flow* menjadi naik. Secara keseluruhan *flow* turun dengan bertambahnya kadar aspal sampai batas tertentu, begitu juga apabila penambahan kadar aspal melebihi batas justru akan menaikkan nilai *flow*. Nilai *Flow* pada campuran Laston tipe X berada diantara 2mm – 4mm yang disyaratkan.

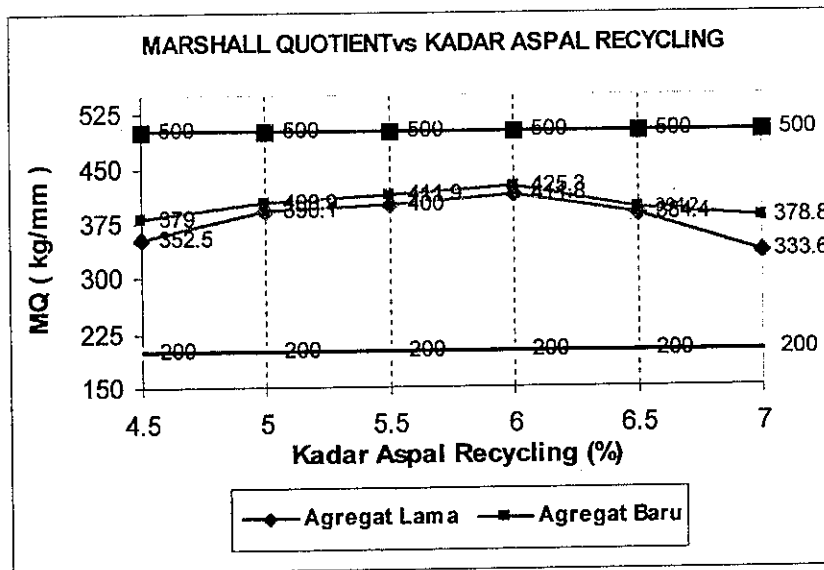
- g. Pengaruh gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama campuran Laston tipe X terhadap nilai *Marshall Quotient* pada variasi kadar Aspal *recycling*.

Marshall Quotient merupakan hasil bagi antara stabilitas dan *flow* yang mengindikasikan pendekatan terhadap kekakuan dan fleksibilitas dari suatu campuran beraspal panas. Besarnya nilai *MQ* tergantung dari besarnya nilai stabilitas yang dipengaruhi oleh gesekan antar butiran dan saling mengunci antar butiran yang terjadi antara partikel agregat dan kohesi campuran bahan susun, serta nilai *flow* yang dipengaruhi oleh viskositas, kadar aspal, gradasi bahan susun, dan jumlah tumbukan.

Pengaruh gradasi dan jenis agregat terhadap nilai *MQ* pada variasi kadar Aspal *recycling* dapat dilihat pada Tabel 4.29. dan Gambar 4.17. dibawah ini :

Tabel 4.29. Pengaruh gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai *MQ* pada variasi kadar Aspal *recycling*

Jenis Agregat	Syarat (kg/mm)	Kadar Aspal(%)					
		1.5+3	2+3	2.5+3	3+3	3.5+3	4+3
		Nilai <i>MQ</i> (kg/mm)					
Agregat Baru	200-500	379	400.9	411.9	425.3	394.2	378.8
Agregat bongkaran / lama	200-500	352.5	390.1	400	411.8	384.4	333.6



Gambar 4.17. Grafik hubungan gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai MQ pada variasi kadar Aspal *recycling*

Dari Tabel 4.29. dan Gambar 4.17, diatas dapat dilihat bahwa nilai MQ campuran Laston tipe X dengan menggunakan agregat hasil bongkaran/lama pada kadar aspal *recycling* optimum 411.6 kg/mm sedangkan nilai Stabilitas menggunakan agregat baru pada kadar aspal *recycling* optimum 425.3 kg/mm. Campuran yang memiliki nilai MQ yang rendah, maka campuran beraspal panas akan semakin fleksibel, cenderung menjadi plastis dan lentur sehingga mudah mengalami perubahan bentuk pada saat menerima beban lalu lintas yang tinggi. Sedangkan campuran yang memiliki nilai MQ tinggi campuran beraspal panas akan kaku dan kurang lentur. Nilai MQ pada campuran Laston tipe X berada diantara stabilitas 200 kg – 500 kg yang disyaratkan.

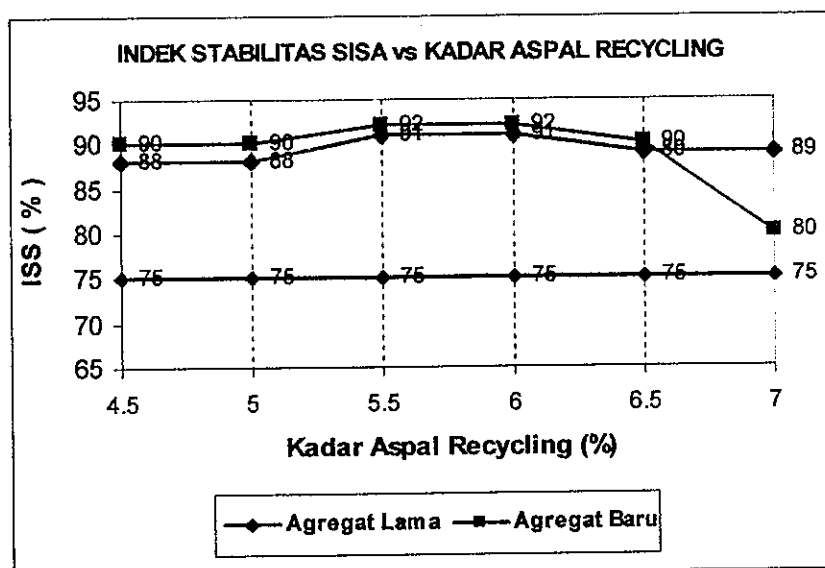
- h. Pengaruh gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama campuran Laston tipe X terhadap nilai Indeks Stabilitas Sisa (ISS) pada variasi kadar Aspal *recycling*

Nilai Indeks Stabilitas Sisa (ISS) diperoleh dengan membandingkan antara nilai stabilitas pada kondisi standar yaitu direndam dalam *water bath* pada suhu 60° C selama 30 (tigapuluh) menit dengan kondisi perendaman yang sama selama 24 (duapuluh empat) jam ini mengindikasikan pendekatan terhadap keawetan (durabilitas) dari suatu campuran beraspal panas.

Pengaruh gradasi dan jenis agregat terhadap nilai ISS pada variasi kadar Aspal *recycling* dapat dilihat pada Tabel 4.30. dan Gambar 4.18. dibawah ini :

Tabel 4.30. Pengaruh gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai ISS pada variasi kadar Aspal *recycling*

Jenis Agregat	Syarat (%)	Kadar Aspal(%)					
		1.5+3	2+3	2.5+3	3+3	3.5+3	4+3
		Nilai ISS (%)					
Agregat Baru	75	90	90	92	92	90	80
Agregat bongkaran / lama	75	88	88	91	91	89	89



Gambar 4.18. Grafik hubungan gradasi agregat baru dan agregat bongkaran/lama terhadap nilai ISS pada variasi kadar Aspal *recycling*

Spesifikasi untuk campuran Laston tipe X, merekomendasikan bahwa indeks stabilitas sisa pada perendaman 24 jam pada suhu 60⁰ C, harus lebih tinggi dari 75%.

Dari Tabel 4.30 dan Gambar 4.18, diatas dapat dilihat bahwa nilai ISS campuran Laston tipe X dengan menggunakan agregat hasil bongkaran/lama pada kadar aspal *recycling* optimum 91 % sedangkan nilai Stabilitas menggunakan agregat baru pada kadar aspal *recycling* optimum 92 %. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran Laston tipe X yang mengalami perendaman dengan suhu 60⁰ C selama 24 jam dibandingkan dengan perendaman standar akan mengalami penurunan nilai stabilitas. Hal ini disebabkan karena selama proses perendaman terindikasi terdapat air yang masuk kepori-pori campuran, sehingga berpengaruh pada sifat adhesi dan kohesi aspal yang akan mengurangi daya ikat aspal terhadap agregat.

4.4. Evaluasi Hasil laboratorium uji *Marshall* dan ISS dengan *Job Mix AC* 1999/2000 dan Campuran *Recycling* menggunakan Agregat Lama dan Agregat Baru terhadap Spesifikasi Campuran Laston tipe X.

Dari hasil pengujian bahan susun pada kadar aspal optimum baik pada campuran *Job Mix AC* maupun campuran *Recycling* dengan menggunakan agregat hasil bongkaran/lama maupun agregat baru didapat hasil rekapitulasi yang memenuhi persyaratan sesuai dalam spesifikasi campuran Laston tipe X pada tahap II, seperti pada Tabel 4.31.

Tabel 4.31. Evaluasi Hasil laboratorium uji *Marshall* dan ISS Campuran *Job Mix AC*, Campuran *Recycling* menggunakan Agregat Lama dan Agregat Baru

No	Karakteristik	Syarat	Pada Kadar aspal Optimum terhadap total agregat		
			<i>Job Mix AC</i>	Agregat lama	Agregat Baru
1	Kepadatan (gr/cc)	-	2.342	2.269	2.307
2	<i>VMA</i> (%)	min 14	15.62	14.94	15.30
3	<i>VFA</i> (%)	min 65	76.76	79.22	75.23
4	<i>VIM</i> (%)	3 – 5	4.10	3.11	3.79
5	Stabilitas (kg)	min 750	1102	1265	1274
6	<i>Flow</i> (mm)	2 – 4	3.1	3.09	3.04
7	<i>MQ</i> (kg/mm)	200 – 500	348.5	411.8	425.3
8	Stabilitas sisa (%)	75 %	79	91	92

Dari hasil pengujian diatas terlihat bahwa semua karakteristik *Marshall* memenuhi persyaratan sesuai dalam spesifikasi campuran Laston tipe X pada kadar aspal optimum 6%, yang ditunjukkan pada tingkat *density Job Mix AC* 2.342 gr/cc > *density* campuran *Recycling* menggunakan agregat lama 2.269 gr/cc dan *density* agregat baru 2.307 gr/cc. Tidak ada persyaratan untuk nilai *density*, untuk evaluasi ditetapkan > 2.0 gr/cc.

Nilai *VMA* untuk *Job Mix AC* 15.62 % > *VMA* campuran *Recycling* menggunakan agregat lama 14.94 % dan menggunakan agregat baru 15.30 %. Persyaratan untuk nilai *VMA* > 14 %, sehingga persyaratan ketiga campuran tersebut terhadap nilai *VMA* dapat diterima.

Nilai *VFA* untuk *Job Mix AC* 76.76 % < *VFA* campuran *Recycling* menggunakan agregat lama 79.22 % dan > *VFA* campuran *Recycling* menggunakan agregat baru 75.2 %. Persyaratan untuk nilai *VFA* > 63 %, sehingga persyaratan ketiga campuran tersebut terhadap nilai *VFA* dapat diterima.

Nilai *VIM* untuk *Job Mix AC* 4.10 % > dari *VIM* campuran *Recycling* menggunakan agregat lama 3.11 % dan *VIM* menggunakan agregat baru 3.79 %. Persyaratan untuk nilai *VIM* 3 % – 5 %, sehingga persyaratan ketiga campuran tersebut terhadap nilai *VIM* dapat diterima.

Nilai stabilitas untuk *Job Mix AC* 1102 kg < dari stabilitas campuran *Recycling* menggunakan agregat lama 1265 kg dan stabilitas menggunakan agregat baru 1274 kg. Persyaratan untuk nilai Stabilitas > 800 kg, sehingga persyaratan ketiga campuran tersebut terhadap nilai stabilitas dapat diterima.

Nilai *flow* untuk *Job Mix AC* 3.1 mm > dari *Flow* campuran *Recycling* menggunakan agregat lama 3.09 mm dan *Flow* menggunakan agregat baru 3.04 mm. Persyaratan untuk nilai *flow* 2 mm – 4 mm, sehingga persyaratan ketiga campuran tersebut terhadap nilai *flow* dapat diterima.

Nilai *MQ* untuk *Job Mix AC* 348.5 kg/mm < dari *MQ* campuran *Recycling* menggunakan agregat lama 411.8 kg/mm dan *MQ* menggunakan agregat baru 425.3kg/mm. Persyaratan untuk nilai *MQ* 200kg/mm - 500 kg/mm, sehingga persyaratan ketiga campuran tersebut terhadap nilai *MQ* dapat diterima.

Nilai ISS untuk *Job Mix AC* 79 % < dari ISS campuran *Recycling* menggunakan agregat lama 91 % dan ISS menggunakan agregat baru 92 %.Persyaratan untuk nilai ISS > 75 %, sehingga persyaratan ketiga campuran tersebut terhadap nilai ISS dapat diterima.

4.5. Evaluasi hasil uji Aspal Hasil Bongkaran Aspal dengan *Cold Milling*

Berdasarkan penyelidikan laboratorium aspal dari hasil bahan bongkaran apabila dibandingkan dengan aspal spesifikasi dari *Job Mix AC Formula* ruas Jalan Gajahmada Tegal Tahun 1999/2000, maka dapat dilihat perubahan yang terjadi seperti disajikan pada Tabel 4.32.

Tabel 4.32. Hasil uji Aspal 60/70 Sebagai Bahan Laston 1999/2000 dan Hasil Bongkarannya 2003

No	Jenis Pemeriksaan	Spesifikasi Standar	Job Mix AC 1999/2000	Hasil Uji Lab. Bahan Bongkaran	Satuan
1	Penetrasi 25°C	60-79	73.5	57.20	0,1 mm
2	Titik Lembek	48-58	50.5	51	°C
3	Titik Nyala	Min 200	235	215	°C
4	Daktilitas 25 °C	Min 100	>150	87.5	cm
5	Kelarutan dalam CCl_4	99	99.29	99.05	% berat
6	Berat Jenis	Min. 1	1.039	1.032	gr/cc

Penurunan Kualitas aspal sebagai bahan pengikat perkerasan disebabkan oleh pengaruh lingkungan yang berupa temperatur, cuaca dan pengaruh beban yang melintasi jalan tersebut. Akibat Pengaruh lingkungan yaitu temperatur, cuaca dan pengaruh beban dapat berupa:

- a. Hasil Pemeriksaan Sifat fisik aspal, seperti tes Penetrasi aspal pada spec.job mix AC 73.5 mm > penetrasi aspal hasil bongkaran 2003 didapat 57.20 mm, mengalami penurunan dan lebih rendah dari spesifikasi, penyebab terjadinya perubahan adalah sebagai berikut : bahan aspal terdiri dari *asphaltene* dan *maltene* dimana *asphaltene* merupakan molekul yang besar, sedangkan *maltene* merupakan cairan yang mudah menguap akibat pengaruh temperatur, seperti halnya dengan :
 - 1). Oksidasi yang terjadi karena pengaruh udara yang mengakibatkan aspal sebagai bahan pembentuk lapis perkerasan lentur yang berada pada kondisi udara terbuka menjadi mengeras.
 - 2). Penguapan yang terjadi karena pengaruh temperatur yang terus menerus, menyebabkan molekul kecil (*maltene*) pembentuk aspal menguap meninggalkan aspal, hal ini mengakibatkan *aging index in air* (pelapukan) semakin lama semakin besar, ini yang menyebabkan angka penetrasi menjadi kecil.
- b. Hasil uji tes titik lembek menunjukkan aspal pada spec.job mix AC 50.5°C < titik lembek aspal hasil bongkaran 2003 didapat 51°C, mengalami kenaikan dan masih memenuhi spesifikasi, penyebab terjadinya perubahan adalah sebagai berikut : Dengan terjadinya proses oksidasi dan penguapan maka jumlah *asphaltene* yang memiliki berat molekul yang besar semakin bertambah. *Asphaltene* ini memiliki titik

lembek yang tinggi, sehingga aspal hasil bongkaran yang mempunyai *asphaltene* yang banyak menjadikan titik lembeknya menjadi tinggi pula.

- c. Hasil uji tes titik nyala menunjukkan aspal pada spec.job mix AC 235⁰C > titik nyala aspal hasil bongkaran 2003 didapat 215⁰C, mengalami penurunan dan masih memenuhi spesifikasi, penyebab terjadinya perubahan adalah sebagai berikut : Dengan terjadinya proses oksidasi dan penguapan maka jumlah molekul *asphaltene* yang memiliki berat molekul besar bertambah. Semakin besar berat molekul komponen pembentuk aspal, maka *flash pointnya* semakin tinggi. Jadi *Maltene* yang merupakan komponen cair dari aspal mudah terbakar, sedangkan *asphaltene* yang merupakan butiran memiliki titik nyala yang tinggi.
- d. Hasil uji tes Daktilitas menunjukkan aspal pada spec.job mix AC diatas 150 cm > Daktilitas aspal hasil bongkaran 2003 didapat 87.5 cm, mengalami penurunan dan lebih rendah dari spesifikasi, penyebab terjadinya perubahan adalah sebagai berikut : Dengan terjadinya proses oksidasi dan penguapan maka komponen cair pada aspal menjadi berkurang . Hal ini mengakibatkan aspal mengalami perkerasan dan getas, sehingga menurunkan nilai daktilitas.
- e. Hasil uji tes kelarutan *CCL₄* menunjukkan aspal pada spec.job mix AC 99.29 % > kelarutan *CCL₄* aspal hasil bongkaran 2003 didapat 99.05 %, mengalami penurunan dan masih memenuhi spesifikasi, penyebab terjadinya perubahan adalah sebagai berikut : dari aspal yang mengalami perkerasan dan getas setelah diproses secara daur ulang/ekstraksi dengan menggunakan pelarut *CCL₄*, kemurnian dari aspal berkurang sehingga menyebabkan kelarutannya pada *CCL₄* menjadi berkurang.

penurunan ini menunjukkan adanya *Aging Index in air* (pelapukan) yang berupa meningkatnya kegetasan dari aspal. Hal yang sama juga ditunjukkan oleh proses *Polymerization* yaitu terjadi pelapukan akibat perubahan resin menjadi *asphaltene*.

4.6. Evaluasi hasil uji Agregat Hasil Bongkaran Aspal Dengan *Cold Milling*

Berdasarkan hasil penyelidikan laboratorium agregat hasil reclaimed material apabila dibandingkan dengan spesifikasi agregat dari *Job Mix AC* ruas Jalan Gajahmada Tegal, maka maximum nominal size berubah dari 19 mm menjadi 15 mm dan gradasi berubah seperti Tabel 4.7. Hasil Uji Agregat Bongkaran Aspal disajikan pada Tabel 4.33 berikut ini:

Tabel 4.33. Hasil uji Agregat Sebagai Bahan Beton Aspal 1999/2000 dan Agregat Hasil Bongkaran Tahun 2003 dan agregat Baru.

No	Jenis Pemeriksaan	Spec.	Spesifikasi Bahan AC 1999/200	Hasil Lab. Bongkaran Agregat lama	Hasil Lab. Agregat baru	Sat.
1	Abrasi	Max. 40	24.16	35.80	23.04	%
2	Kelekatan terhadap Aspal	95+	>95	98	98	%
3	BJ Semu Agregat Kasar	2,5	2.753	2,538	2.618	gr/cc
4	BJ Semu Agregat Halus	2,5	2.746	2,667	2.806	gr/cc
5	Absorpsi Agregat Kasar	3	1.411	0.331	1.400	%
6	Absorpsi Agregat Halus	3	2.177	2.459	1.833	%
7	Sand Equivalent	Min.50	64.80	86.67	90.7	%
8	Soundness	-	-	5.06	1.87	%

Agregat hasil bahan bongkaran setelah dilaksanakan penyelidikan di laboratorium terhadap spesifikasinya, dan apabila dibandingkan dengan spesifikasi agregat semula (Spesifikasi *Job Mix AC* ruas Jalan Gajahmada Tegal 1999/2000) adalah sebagai berikut:

- a. Hasil uji pemisahan material yang dilakukan terhadap bahan bongkaran 2003 didapat nominal size terbesar $\frac{1}{2}$ " lebih kecil dari spec.job mix AC $\frac{3}{4}$ ", terjadi penurunan (mengecilnya butiran agregat) < dari spesifikasi, ini diakibatkan oleh :
 - 1). Pengerukan butiran agregat, mengalami pecah-pecah, sehingga nominal sizenya menjadi mengecil dari keadaan semula.
 - 2). Degradasi akibat *over load* (kelebihan beban) akibat pesatnya peningkatan arus lalu lintas yang harus didukung, menyebabkan pecahnya butiran agregat.
- b. Hasil uji pemisahan material yang dilakukan terhadap bahan bongkaran 2003 didapat gradasi menjadi lebih halus dari spec.job mix AC, terjadi penurunan (mengecilnya butiran agregat) < dari spesifikasi, ini diakibatkan oleh *Scarifying* karena pecahnya butiran agregat, gradasi berubah dengan semakin berkurangnya agregat dengan nominal size besar menjadi butiran lebih kecil.
- c. Hasil uji kualitas Abrasi menunjukkan agregat pada spec.job mix AC 24.16 % > abrasi agregat hasil bongkaran 2003 didapat 35.80, terjadi kenaikan tetapi masih memenuhi

- spesifikasi max. 40%, penyebab terjadinya kenaikan prosentasi abrasi akibat *over load* dan pelapukan menjadikan ketahanan agregat terhadap abrasi menjadi berkurang.
- d. Hasil uji kelekatan terhadap aspal tidak terjadi perubahan, dalam kondisi tetap.
- e. Hasil uji Absorpsi agregat kasar pada *spec.job mix AC* 1.411% > absorpsi agregat kasar hasil bongkaran 2003 didapat 0.331%, terjadi penurunan tetapi masih memenuhi spesifikasi max. 3%, penyebab terjadinya penurunan, dimungkinkan agregat yang digunakan memiliki pori dalam yang lebih kecil dari pori luar. Akibat dari pecahnya agregat menyebabkan pori yang semula, pori dalam menjadi pori luar, sehingga kadar pori bertambah kecil yang menyebabkan absorpsi menjadi menurun.
- f. Hasil uji Absorpsi agregat halus pada *spec.job mix AC* 2.177% < absorpsi agregat halus hasil bongkaran 2003 didapat 2.459%, terjadi kenaikan tetapi masih memenuhi spesifikasi max. 3%, penyebab terjadinya kenaikan, dimungkinkan agregat yang digunakan memiliki pori dalam yang lebih besar dari pori luar. Akibat dari pecahnya agregat menyebabkan pori yang semula, pori dalam menjadi pori luar, sehingga kadar pori bertambah besar yang menyebabkan absorpsi menjadi meningkat.
- g. Hasil uji *Sand equivalent* agregat pada *spec.job mix AC* 64.80% < *Sand equivalent* agregat hasil bongkaran 2003 didapat 86.67%, terjadi kenaikan tetapi masih memenuhi spesifikasi min. 50%, penyebab terjadinya kenaikan, akibat beban yang melalui ruas jalan tersebut.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan pembahasan seperti yang telah disampaikan di muka, dapat diambil suatu kesimpulan dari hasil analisa uji bahan aspal dan agregat serta hasil uji *Marshall* dan ISS tersebut diatas, dapat ditunjukkan seperti :

5.1.1. Hasil Uji Fisik Aspal

a. Proses Oksidasi

Aspal sebagai bahan utama pembentuk suatu lapis keras lentur yang berada di udara terbuka terkontaminasi oleh udara (teroksidasi). Hal ini akan mengakibatkan aspal menjadi mengeras (membentuk lapisan tipis bagian atas) yang akan mudah larut dalam air. Karena masa layanan yang lama daari tahun 2000 sampai 2003 (3 tahun), maka proses oksidasi dan penggerusan ban yang berjalan terus-menerus mengakibatkan terjadinya penurunan kadar aspal pada konstruksi dari 5,521% pada tahun 2000 menjadi 5,10% (rata-rata) pada tahun 2003 (Hasil Pengujian Laboratorium ATS Semarang, Agustus 2003).

b. Proses *Volatilization* (Penguapan)

Akibat pengaruh temperatur panas yang terus menerus menyebabkan molekul-molekul kecil pembentuk aspal menguap. Karena masa pelayanan dari tahun 2000 sampai dengan tahun 2003 (3 tahun), maka pemanasan alami yang berlangsung terus-menerus menyebabkan molekul-molekul kecil yang meninggalkan aspal menjadi semakin besar jumlahnya. Hal ini menyebabkan terjadinya pelapukan (*Aging Index in air*) juga semakin besar. Pada tahun 1999/2000 spesifikasi aspal menunjukkan penetrasi pada suhu 25°C = 73.5 mm dan daktilitas pada suhu 25°C adalah > 150 cm , sedangkan pada tahun 2003 terjadi penurunan daktilitas pada suhu 25°C menjadi 87.50cm.

Penurunan ini menunjukkan adanya *Aging Index in air* (pelapukan) yang berupa meningkatnya kegetasan dari aspal. Hal yang sama juga ditunjukkan oleh proses *Polymerization* yaitu terjadi pelapukan akibat perubahan resin menjadi *asphaltene*.

5.1.2. Hasil Uji Fisik Agregat

Agregat hasil bahan bongkaran setelah dilaksanakan penyelidikan di laboratorium terhadap spesifikasinya, dan apabila dibandingkan dengan spesifikasi agregat semula (Spesifikasi *Job Mix AC* ruas Jalan Gajahmada Tegal 1999/2000) adalah sebagai berikut:

1. Konsistensi agregat ditunjukkan oleh abrasi yang terjadi dan *Soundness* dari material
2. Kondisi agregat cenderung lebih banyak fraksi yang halus karena faktor repetisi beban lalu-lintas dan pengaruh alat pengerukan aspal.
3. Agregat halus prosentasenya cenderung lebih kecil karena banyak yang bercampur aspal.

Meningkatnya abrasi dan keausan dari agregat dalam konstruksi perkerasan sangat dipengaruhi oleh komponen seperti dibawah ini :

a. Gradasi Agregat

Dengan pemilihan gradasi agregat yang sesuai dengan jenis konstruksi, maka penggunaan perekat akan lebih efisien, sehingga kekedapan yang diperoleh menjadi optimum. Oleh karena itu, pengaruh lingkungan terhadap agregat dapat ditekan seminimal mungkin. Gradasi tertutup yang dipergunakan dalam konstruksi AC ruas Jalan Gajahmada Tegal tahun 1999/2000 sudah tepat untuk konstruksi yang dipergunakan, hal ini mengakibatkan penurunan konsistensi dari agregat hasil *recycling* tidak terlalu besar, sehingga masih layak untuk digunakan sebagai bahan lapisan atas (*surface course*)

b. Kekuatan dari butiran

Agregat yang memiliki kekuatan butiran tinggi akan memiliki kemampuan tinggi pula untuk bertahan dari pengaruh abrasi dan pelapukan akibat pengaruh beban dan lingkungan. Spesifikasi semula yaitu: abrasi 24,16% dan *soundness* - %, menjadi abrasi 35.80% dan 23.04% dan *soundness* 5.06 % dan 1.87 %, yang lebih rendah dari persyaratan yaitu abrasi maksimum 40%.

c. Kadar pori

Pori agregat akan mengurangi kekuatan butir agregat. Apabila diberi beban agregat akan lebih mudah mengalami pelapukan. Pori juga menjadi sarang air yang apabila dipergunakan dalam perkerasan akan mengurangi kekuatan dari konstruksi. Akibat

pembebanan yang dipikul akan sangat mempengaruhi berkurangnya kekuatan agregat. Dari hasil absorpsi agregat kasar 1.411% berubah menjadi 0.331% dan agregat halus 2,177% berubah menjadi 2.459%. Sedangkan spesifikasi bahan konstruksi untuk lapis atas adalah 3%, jadi agregat bahan bongkaran masih memenuhi syarat.

5.1.3. Hasil Uji *Marshall* dan ISS terhadap Campuran Laston.

Karena terjadi perubahan *nominal size* dari agregat, maka untuk menyesuaikan dengan kualitas spesifikasi semula, harus dilakukan modifikasi dengan menambahkan fraksi agregat kasar dan medium, sedangkan untuk bahan aspal menggunakan hasil ekstraksi dan penyulingan dari bahan bongkaran dimodifikasi dengan penambahan bahan peremaja ditetapkan sebesar 3%.

Dari hasil pengujian *Marshall* dan ISS tahap II, yang menggambarkan kinerja konstruksi jalan selama melayani kebutuhan lalu lintas, dimana dalam penelitian ini untuk kepentingan masa layanan diatas 1.000.000 *ESA* (*equivalent standard axel*). ini ditunjukkan pada :

- a. Hasil nilai kepadatan menunjukkan ketiga campuran baik nilai *Job Mix AC* 2.342gr/cc, campuran *recycling* dengan menggunakan agregat bongkaran/lama 2.269 gr/cc, dan campuran *recycling* dengan menggunakan agregat baru 2.307 gr/cc, terlihat menurun tetapi layak untuk dipergunakan kembali, rujukan adalah 2 gr/cc.
- b. Untuk analisa ketiga rongga (*VMA*, *VFA*, dan *VIM*) menunjukkan ketiga campuran baik nilai *Job Mix AC* (15.62%,76.76%,4.10%), campuran *recycling* dengan menggunakan agregat bongkaran/lama (14.94%,79.22%,3.11%), dan campuran *recycling* dengan menggunakan agregat baru (15.30%,75.23%,3.79%), terlihat campuran *recycling* dengan menggunakan agregat bongkaran/lama sedikit lebih baik, hanya terlalu kaku dan masih layak untuk dipergunakan kembali.
- c. Hasil pengujian material benda uji (*Stabilitas*, *Flow*, *MQ* dan ISS) menunjukkan ketiga campuran baik nilai *Job MixAC* (1102kg, 3.1mm, 348.5 kg/mm, 79%), campuran *recycling* dengan menggunakan agregat bongkaran/lama (1265kg, 3.09mm, 411.8kg/mm, 91%), dan campuran *recycling* dengan menggunakan agregat baru (1274kg, 3.04mm, 425.3kg/mm, 92%), terlihat campuran *recycling* dengan

menggunakan agregat bongkaran/lama lebih baik dari nilai *Job Mix AC* dan dapat dipergunakan kembali.

Dengan pemanfaatan optimal maka teknik daur ulang dapat merupakan salah satu alternatif untuk pemeliharaan dan rehabilitasi lapis keras lentur dengan keuntungan penghematan material, energi, dan terutama menjaga kualitas lingkungan dengan berkurangnya penambangan aspal dan agregat.

5.2 Saran

Sebelum menerapkan metoda *recycling* harus diketahui tingkat dan jenis kerusakan sehingga penanganan yang diterapkan dapat tepat guna dan hemat biaya. Untuk Pengambilan bahan bongkaran yang dipergunakan sebagai bahan penelitian harus diusahakan dalam satu *station*, satu lajur dan pada jarak tertentu, sehingga bahan yang dipergunakan untuk penelitian sedapatnya homogen dalam kualitas. Dengan demikian diharapkan memperoleh kualitas contoh penelitian yang sama dan homogen. Sedangkan Kualitas bahan penelitian sangat tergantung pada homogenitas dan kualitas bahan bongkaran. Untuk menjaga terjadinya contoh penelitian yang memberi nilai bias, harus dibuat contoh penelitian dengan jumlah lebih banyak agar nilai rata-rata diperoleh presisi lebih kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO, 1999, *Standard Specifications for Transportation Material and Methods of Sampling and Testing, Part I Specification, 15th Edition*, AASTHO Publication, Washington.
- AASHTO, 1999, *Standard Specifications for Transportation Material and Methods of Sampling and Testing, Part II Specification, 15th Edition*, AASTHO Publication, Washington.
- ASTM, 1980, *Annual Book of ASTM Standards*, part 15 Road Paving
- Atkins, Harold N., 1997, *Highway Materials, Soils, and Concretes, Third Edition*, PRENTICE HALL, Ohio
- Bagus Priyatno, 2001, *Perkembangan Teknologi Perkerasan Jalan*, Pusat Pengembangan Perguruan Tinggi Swasta Kopertis Wilayah VI Jawa Tengah.
- Bina Marga, 1983, *Spesifikasi Teknik Bina Marga*, P3TN (1993)
- Bina Marga, 1999, *Job Mix AC Formula Pejagan-Losari*
- Departemen Pekerjaan Umum, 1987, *Petunjuk Pelaksanaan Lapis Aspal Beton (LASTON) untuk Jalan Raya*, SKBI-2.4.26, UDC : 626.75 (02), Yayasan Badan Penerbit PU Jakarta.
- Hunter R N, (1994), *Bituminous Mixtures in Road Construction*, Thomas Telford Services Ltd, London.
- Indraswari, 1999, *Pengantar Perencanaan Campuran Perkerasan Aspal*, Materi Pembekalan PIP Bidang Kebinamargaan, Jakarta
- Joewono Prasetijo dan Rini Handayani, 2000, *Pengaruh Faktor Kekuatan (Modulus Elastisitas) Bahan Terhadap Besarnya Nilai Ketebalan Lapis Tambahan (Overlay)*, Makalah Simposium III FSTPT, ISBN no. 979-96241-0-X, UGM Yogyakarta
- Krebs, R.D. and Walter, R.D., 1971, *Highway Material*, McGrawhill, USA
- Leger Jalan Gajahmada-Tegal Jawa Tengah, 1999, DPU Kota Tegal
- Miftahul Fauziah, (2001), *Pengaruh Kadar Serbuk Belerang sebagai Filler Pengganti Terhadap Karakteristik Beton Aspal*, Tesis MSTT-UGM, Yogyakarta
- Niluh E, 1997, *Pengaruh Daur Ulang Terhadap Sifat-Sifat Fisik Beton Aspal*, Thesis, UGM.
- OECD, 1978, *Road Research Maintenance Technique for Road Surfacing*, Publication Office OECD, Paris, Perancis

- Pacific Consultant International and Associates, 1993, *DESIGN AND SPECIFICATION OF RECYCLING*
- Proyek Rehabilitasi/Pemeliharaan Jalan dan Jembatan Provinsi Jawa Tengah, 2000, *Job Mix Formula ATBL*, Dept. Kimpraswil
- Pusat Pelatihan MBT, 1992, *Pelatihan Assisten Teknisi Laboratorium Pengujian Aspal*, Bandung
- Quality Achievement Aspal Beton*, Maret 2000, Makalah, MBI
- Reichert, U., 1977, *Modern Methods of Road Maintenance*, Wirtgen GmbH, West Germany.
- Russ Bona Frazila, 2000, Makalah Simposium III FSTPT, ISBN no. 979-96241-0-X, UGM Yogyakarta
- Shell Bitumen, 1990, *The shell Bitumen Handbook*, East Molesey Surrey
- Soedharmanto dan Dardak, 1992, *Percobaan Daur Ulang in Place di Camp Gunung Putri Jalan Tol Jagorawi*, Badan Penelitian dan Pengembangan PU, Bandung
- Sukirman, Silvia, 1999, *Perkerasan Lentur Jalan Raya*, Nova, Bandung
- Sartono W, 1990, *The Influences of Temperature at Compaction on Asphaltic Concrete Layer in Road*, Thesis, Tidak dipublikasikan, Technische Universiteit Delft.
- The Asphalt Institute, 1979, *Thickness Design Full-Depth Asphalt Pavement Structure For Highway & Street*.
- Yoder, E.J. and Witezak, M.W., 1975, *Principles of Pavement Design, 2nd Edition*, John Wiley & Son, New York